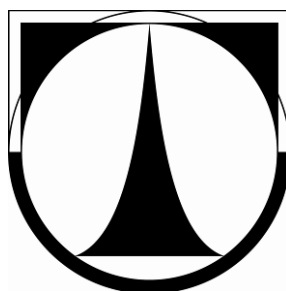


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra energetických zařízení



OLDŘICH STUPKA

Variabilní měřicí prostor pro supersonický aerodynamický tunel

Variable test section for supersonic wind tunnel

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.

Konzultant diplomové práce:

Doc. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.

Rozsah práce:

Počet stran: 109

Počet obrázků: 96

Počet tabulek: 0

Počet grafů: 1

Počet příloh: 3

Liberec 2011



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Oldřich S T U P K A
Studijní program	magisterský - M2301 strojní inženýrství
Obor	3901T003 Aplikovaná mechanika
Zaměření	Mechanika tekutin a termodynamika

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Variabilní měřicí prostor pro supersonický aerodynamický tunel

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Navrhněte variabilní měřicí prostor pro supersonický aerodynamický tunel.
2. Pomocí metody charakteristik navrhněte vstupní trysky, pokuste se pro tuto úlohu sestavit návrhový program. Návrhy trysek ověřte numericky v programu ANSYS/FLUENT pro vazké a nevazké proudění.
3. Vyrobené trysky a variabilní měřicí prostor proměřte pomocí schlierové metody a snímačů tlaku.
4. Navrhněte ejektor pro pohon supersonického tunelu a měřicího prostoru.
5. Navrhněte další experimenty realizovatelné v měřicím prostoru.
6. Formulujte následující závěry:

- a) Funkčnost navrženého měřicího prostoru a jeho experimentální možnosti.
- b) Shoda metody charakteristik s numerickou metodou.
- c) Vliv vazkosti na proudění v tryskách, porovnání experimentu s návrhem a s numerickým řešením, analýza experimentu.
- d) Výsledný návrh ejektoru určeného k pohonu tunelu.

Forma zpracování diplomové práce:

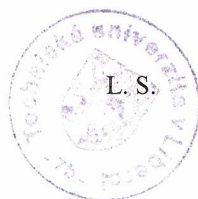
- původní zpráva: 40
- grafické práce: 20

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):


- [1] V. Dvořák, O. Stupka, J. Kolář: Design and Numerical Calculation of Variable Test Section for Small Supersonic Wind Tunnel, XXIX. Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky, 23. – 25. 6. 2010, Rožnov pod Radhoštěm, Česká republika, pp. 41 – 43, ISBN 978-80-248-2244-0.
- [2] Krahulec Š.: Výpočtové metody pro návrh vzduchových ejektorů. Diplomová práce, vedoucí Dvořák V., Technická univerzita v Liberci, 2004.
- [3] Panuš R.: Optimalizace nadzvukových trysek. Diplomová práce, vedoucí Dvořák V., Technická univerzita v Liberci, 2004.
- [4] V. Dvořák: Shape Optimization of Supersonic Ejector for Supersonic Wind Tunnel. In.: Applied and Computational Mechanics, Volume 4, Number 1, 2010, Plzeň, Česká republika, pp 15 - 24, ISSN 1802-680X.
- [5] Shapiro A.H.: The dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow. The Ronald Press Company, New York 1953.

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Doc. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.




doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D..
vedoucí katedry


doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.
děkan

V Liberci dne 13.4.2011

ANOTACE

Variabilní měřicí prostor pro supersonický aerodynamický tunel

Diplomová práce se zabývá návrhem, stavbou a odzkoušením variabilního měřicího prostoru. Pro jeho počáteční provoz byly vyrobeny tři různé trysky pro Machova čísla 1,4, 1,8 a 2,2. Tyto trysky byly navrženy pomocí metody charakteristik. Součástí této práce bylo navržení a sestavení programu pro výpočet tvaru trysky pomocí této metody. Navržené profily byly simulovány v programu Fluent pro ověření platnosti metody charakteristik. Při experimentálním měření v laboratoři vysokých rychlosti ústavu termomechaniky AVČR byly pořízeny snímky proudového pole pomocí barevné šlírové metody. Ty byly porovnány s numerickou simulací a s výpočty pomocí 1D metody.

Klíčová slova: měřicí prostor, aerodynamický tunel, metoda charakteristik, nadzvukové proudění.

ANNOTATION

Variable test section for the supersonic wind tunnel.

Diploma thesis deals with design, construction and testing of a variable test section. For its initial operations, three different nozzles for Mach numbers 1.4, 1.8 and 2.2 were made. These nozzles were designed using the method of characteristics. A Part of this work was to design and build a program to calculate the shape of jets using this method. Proposed profiles were simulated in software Fluent to verify the validity of the method of characteristics. During the experimental measurements in the laboratory of high speed in the Institute of Thermodynamics AVČR, images of the flow field using the colour schlieren method was taken. These were compared with numerical simulations and calculations using 1D method.

Keywords: test section, aerodynamic tunnel, method of characteristics, supersonic flow.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s platností zákona č. 121/2000 Sb. o autorském právu, zejména § 60 (školní dílo) a § 35 (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy), vztahujícího se plně na mou diplomovou práci.

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše). Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci dne 23.5.2011

.....
Oldřich Stupka

Poděkování

Rád bych poděkoval především panu Doc. Ing. Václavu Dvořákovi, Ph.D. za jeho trpělivost a čas, který mi během psaní diplomové práce věnoval. Rovněž děkuji Ing. Janu Kolářovi a pracovníkům Ústavu termomechaniky AV ČR za odbornou pomoc při měření, zejména Ing. Martinu Luxovi, Ph.D.

Mé díky si také nemalou měrou zaslouží má rodina za podporu při studiích, bez které bych je nikdy nedokončil. Zvláště pak má přítelkyně Eva, která při mně stála za všech okolností.

Seznam použitého značení

Značka	Jednotka	Veličina
a	m/s	rychlost zvuku
A	m ²	plocha, průtočný průřez
c	m/s	okamžitá rychlost
c_p	J/(kg K)	měrná tepelná kapacita - izobarická
c_v	J/(kg K)	měrná tepelná kapacita - izochorická
h	J/kg	měrná entalpie
k	-	počet odrazů
L	m	délka dráhy ve zkušebním prostoru
m	kg	Hmotnost
M	-	Machovo číslo
\dot{m}	kg/s	hmotnostní tok
M_m	kg/kmol	molární hmotnost
n	-	celkový počet charakteristik
n_i	-	index lomu
p	Pa	Tlak
r	J/(kg K)	měrná plynová konstanta
Re	-	Reynoldsovo číslo
R_{hr}	m	poloměr zaoblení hrdla
s	J/(kg K)	měrná entropie
t	s	čas
T	K	termodynamická teplota
u	J/kg	měrná vnitřní energie
v	m ³ /kg	měrný objem
x	m	souřadnice
y	m	souřadnice
α	°	Mach úv úhel
Γ	-	ejekční součinitel
$\Delta\alpha$	°	úhel odklonu světelných paprsků
$\Delta\omega$	°	intenzita charakteristik
Θ	-	poměr klidových teplot
κ	-	izoentropický součinitel
λ	-	Lavalovo číslo
μ	-	poměr průtočných průřezů
ϑ	°	směrnice proudu
ρ	kg/m ³	hustota
φ	°	polovina úhlu rozevření trysky
ψ	-	průtokový součinitel
ω	°	úhel odklonu proudu

Význam indexů

0	klidové hodnoty
01	klidové hodnoty hnacího prostředí
02	klidové hodnoty hnaného prostředí
03	klidové hodnoty smíšeného prostředí

1	hnací prostředí
12	vstup do směřovací komory
2	hnané prostředí
3	stav po smíšení
4	výstup z difuzoru
<i>b</i>	barometrický
<i>i</i>	index charakteristik
<i>E</i>	výstupní průřez trysky
<i>j</i>	index pole
<i>kr</i>	kritický stav
<i>m</i>	mezní
<i>max</i>	maximální hodnota
<i>n</i>	návrhová hodnota
<i>nevaz</i>	nevazká tekutina
<i>nevr</i>	nevratný děj
<i>pl</i>	plánované
<i>vaz</i>	vazká tekutina
<i>vyp</i>	vypočítané
<i>x</i>	stav před rázovou vlnou
<i>y</i>	stav za rázovou vlnou

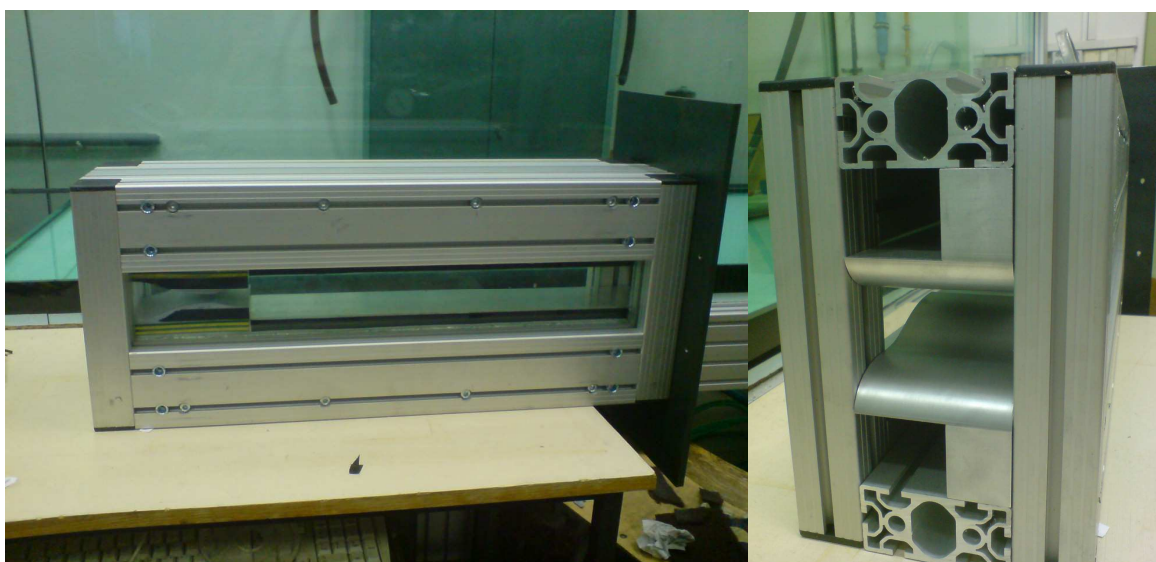
Obsah

1. Úvod	- 10 -
2. Teorie dynamiky plynů a metody charakteristik	- 12 -
2.1 Úvod do teorie stlačitelných plynů	- 12 -
2.1.1 Rovnice popisující izoentropické proudění	- 13 -
2.1.2 Doplnující rovnice.....	- 13 -
2.2 Princip trysky kombinovaného tvaru	- 14 -
2.2.1 Jednorozměrné izoentropické proudění	- 14 -
2.2.2 Kritický stav	- 15 -
2.2.3 Hmotnostní tok.....	- 16 -
2.2.4 Rozdíl mezi nadzvukovým a podzvukovým prouděním.....	- 16 -
2.3 Kolmá rázová vlna	- 17 -
2.4 Režimy trysky kombinovaného tvaru	- 18 -
2.4.1 Mezní režim	- 19 -
2.4.2 Režimy s rázovou vlnou v nadzvukové části trysky	- 19 -
2.4.3 Režim s rázovou vlnou ve výstupním průřezu trysky	- 19 -
2.4.4 Režimy přeexpandovaného proudu	- 20 -
2.4.5 Návrhový režim	- 20 -
2.4.6 Režimy podexpandovaného proudu.....	- 21 -
2.5 Dynamické funkce proudění ideálního plynu	- 21 -
2.6 Ejektory.....	- 22 -
2.7 Metoda charakteristik.....	- 24 -
3. Experimentální metody.....	- 26 -
3.1 Šlířová zobrazovací metoda	- 26 -
3.1.1 Princip šlířové metody.....	- 26 -
3.1.2 Čtení barevného šlířografu.....	- 31 -
3.2 Snímání tlaku.....	- 32 -
3.3 Nadzvukové tunely	- 34 -
3.3.1 Dělení podle Machova čísla	- 34 -
3.3.2 Provozní režim aerodynamického tunelu	- 34 -
3.3.3 Otevřený a uzavřený systém.....	- 35 -
3.3.4 Druhy pohonů	- 36 -
4. Konstrukce měřicího prostoru.....	- 38 -
4.1 Základní idea variabilního měřicího prostoru	- 38 -

4.2 Rozměry měřicího prostoru	- 39 -
4.3 Použité materiály	- 40 -
4.4 Použité technologie výroby	- 40 -
4.5 Finální návrh variabilního měřicího prostoru	- 41 -
4.6 Montáž	- 42 -
5. Návrh geometrie trysek	- 45 -
5.1 Praktický postup při návrhu pomocí metody charakteristik	- 45 -
5.1.1 Postup s minimální podporou počítače	- 45 -
5.1.2 Využití programu	- 49 -
5.2 Jednotlivé trysky	- 52 -
5.2.1 Tryska $M_n=1,4$	- 54 -
5.2.2 Tryska $M_n=1,8$	- 56 -
5.2.3 Tryska $M_n=2,2$	- 58 -
6. Simulace celého měřicího prostoru	- 60 -
7. Experiment.....	- 61 -
8. Srovnání experimentu a numerické simulace	- 64 -
8.1 Tryska $M_n=1,4$	- 66 -
8.2 Tryska $M_n=1,8$	- 77 -
8.3 Tryska $M_n=2,2$	- 89 -
9. Závěr	- 102 -
9.1 Dosažené výsledky.....	- 102 -
9.2 Poznatky pro další vývoj.....	- 103 -
Seznam použité literatury.....	- 104 -
Seznam příloh.....	- 106 -

1. Úvod

Cílem této diplomové práce je navrhnout, sestavit a odzkoušet variabilní měřicí prostor pro experimentální měření a vizualizaci proudění vzduchu při nadzvukových rychlostech. Výsledný produkt by měl sloužit pro výukové účely Katedry energetických zařízení TUL jako součást ejektorového otevřeného supersonického aerodynamického tunelu. Záměrem bylo, aby studenti měli možnost studovat děje při nadzvukových rychlostech přímo v prostředí školy. V laboratoři je k dispozici zařízení pro vizualizaci proudící tekutiny pomocí šlírové metody. Měřicí prostor byl proto konstruován s ohledy na zvolenou metodu vizualizace a je opatřen skleněnými průzory (viz obr. 1.1) z kvalitního pevnostního skla.



Obr. 1.1 Hotový měřicí prostor. Pohled z boku a pohled zepředu.

Aerodynamický tunel bude poháněn vzduchovým ejektorem, jehož podrobný návrh a optimalizace byly náplní jiné diplomové práce [1]. Protože ještě nebyl ejektor k dispozici, proběhla měření v laboratoři vysokých rychlostí ústavu termomechaniky AVČR v Novém Kníně. Výhodou měření v tomto zařízení byla možnost použití barevného šlírového přístroje místo černobílého a několikanásobně delší maximální doba měření, resp. díky velkému objemu podtlakové nádoby a relativně malému hmotnostnímu toku vzduchu tunelem se během měření téměř nezměnil podtlak udržovaný v nádobě.

Při měření se pořizovaly záběry proudění a zaznamenával se tlak, při kterém došlo k vyfocení. Snahou bylo zachytit jak klíčové režimy proudění, jako je mezní

režim, rázová vlna ve výstupním průřezu a návrhový režim, tak i režimy mezi nimi (rázová vlna v trysce, přeexpandovaný proud, podexpandovaný proud). A to pro tři různé tvary trysek, navržených pro Machova čísla $M_n=1,4$, $M_n=1,8$ a $M_n=2,2$. Pořízené snímky vypovídají o úspěchu záměru zachytit proudění při zmíněných režimech.

Pro porovnání byl pak celý měřicí prostor simulován v programu Fluent, kdy jako okrajové podmínky byly použity hodnoty naměřené v laboratoři v průběhu měření.

Aby bylo možné během krátké doby, např. jednoho dne nebo jednoho vyučovacího bloku, vyzkoušet více trysek a modelů, bylo zapotřebí přizpůsobit konstrukci rychlé výměně vnitřních součástí. To vylučuje použití dlouho schnoucích tmelů a těsnících past na rozebíratelné části. Hlavně to však vylučuje rozebrání celého měřicího prostoru kvůli výměně jednoho modelu. To je vyřešeno konceptem pevného samonosného rámu s jednou odnímatelnou stěnou, ke kterému se modely připevňují pomocí šroubů. To znamená, že i když se vyndají všechny modely, rám zůstane v celku a může být stále upevněn např. k pojezdovému stolu. Tím se zkracuje čas potřebný pro výměnu modelu a snižuje se fyzická náročnost měření pro obsluhu, jelikož měřicí prostor i s tryskami a modely váží téměř 50kg.

2. Teorie dynamiky plynů a metody charakteristik

Podrobněji se teorii dynamiky plynů věnuje doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D. ve skriptech [2] a [3]. V této práci jsou pouze shrnuty základní vztahy a myšlenky důležité pro návrh a analýzu experimentu. Metoda charakteristik je podrobněji rozebrána v práci [4].

Při studiu mechanismů nadzvukového proudění již nelze vystačit s teorií nestlačitelné tekutiny. Pro většinu výpočtů však stále můžeme použít vzduch uvažovat jako ideální plyn, a jeho proudění v krátkých tryskách za izoentropické, což umožňuje předpoklad energeticky izolovaného proudění a pouze vratných změn plynu.

2.1 Úvod do teorie stlačitelných plynů

Základním zjednodušením je uvažování termodynamicky rovnovážného stavu ideálního plynu. Potom platí stavová rovnice pro tlak p , teplotu T a hustotu ρ

$$p = \rho r T, \quad (2.1)$$

kde r je měrná plynová konstanta počítaná ze vztahu pro molární hmotnost M_m a univerzální plynovou konstantu R

$$r = \frac{R}{M_m}. \quad (2.2)$$

V ideálním plynu dále platí pro měrné tepelné kapacity vztahy

$$c_p = r \frac{\kappa}{\kappa - 1} \quad (2.3)$$

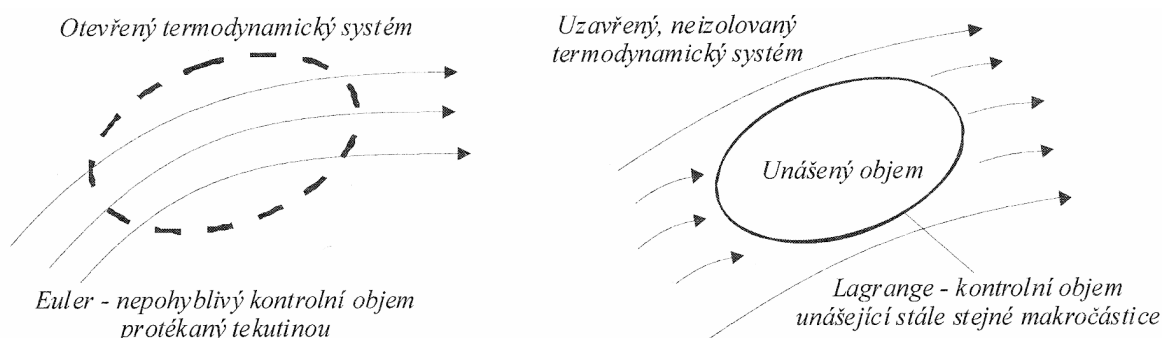
$$c_v = r \frac{1}{\kappa - 1}. \quad (2.4)$$

Měrná entalpie (2.5) a měrná vnitřní energie (2.6) jsou pro ideální plyn definované rovnicemi

$$h = c_p T \quad (2.5)$$

$$u = c_v T. \quad (2.6)$$

Bilanční rovnice použité při odvozeních vychází z Eulerova přístupu, kdy sledujeme příslušnou oblast – kontrolní objem – nezávislý na pohybujícím se prostředí, které jím protéká. Přístup, kdy sledujeme stále stejné částice proudu se nazývá Lagrangeův. Rozdíl mezi oběma přístupy je znázorněn na obr. 2.1.



Obr. 2.1 Eulerův a Lagrangeův přístup [2]

2.1.1 Rovnice popisující izoentropické proudění

Stěžejní rovnice popisující problematiku jednorozměrného izoentropického stacionárního proudění bez tření jsou:

rovnice kontinuity v integrálním a diferenciálním tvaru

$$\rho c A = \text{konst.}, \quad (2.7a)$$

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dc}{c} + \frac{dA}{A} = 0 \quad (2.7b)$$

pohybová rovnice v diferenciálním tvaru

$$\frac{dc^2}{2} + \frac{dp}{\rho} = 0 \quad (2.8)$$

energetická rovnice v integrálním a diferenciálním tvaru

$$h + \frac{c^2}{2} = \text{konst.}, \quad (2.9a)$$

$$dh + c dc = 0 \quad (2.9b)$$

zákon o entropii (2.10)

$$ds = \frac{dq}{T} + ds_{\text{nevr}} \quad (2.10)$$

2.1.2 Doplňující rovnice

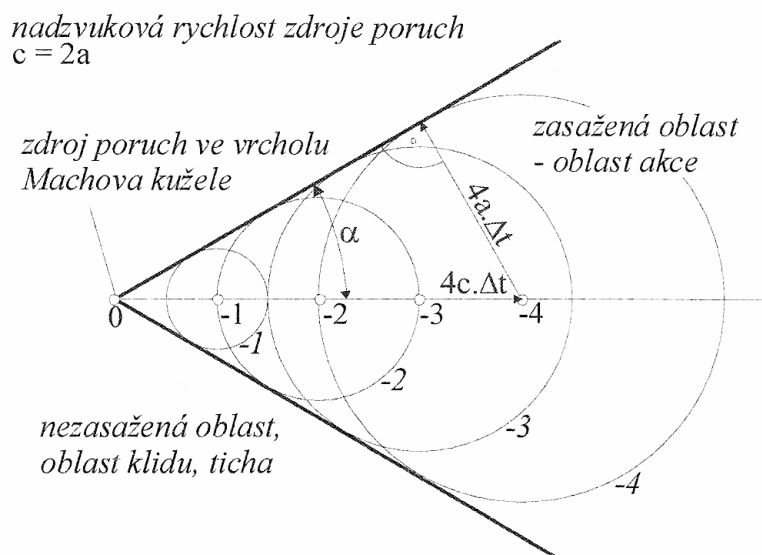
Další rovnice, které se týkají proudění při nadzvukových rychlostech jsou rychlost zvuku (2.11) a Machovo číslo (2.12), které je definováno jako podíl rychlosti pohybu v daném prostředí a odpovídající rychlosti zvuku.

$$a = \sqrt{\kappa r T} \quad (2.11)$$

$$Ma = M = \frac{c}{a}. \quad (2.12)$$

Pro analýzu experimentu je zapotřebí ještě definovat Machův úhel, který je polovinou vrcholového úhlu Machova kužele. Pokud se bude zdroj zvuku (tlakových poruch) pohybovat nadzvukovou rychlostí, nastane případ jako na obr. 2.2, kdy kužel, jehož povrch je tečný na vlnoplochy šíření zvuku, nazýváme Machovým kuželem. Polovina jeho vrcholového úhlu je pak hledaný Machův úhel, jehož vztah pro výpočet pomocí Machova čísla je

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{1}{M}\right), \quad M \in \langle 1; \infty \rangle. \quad (2.13)$$



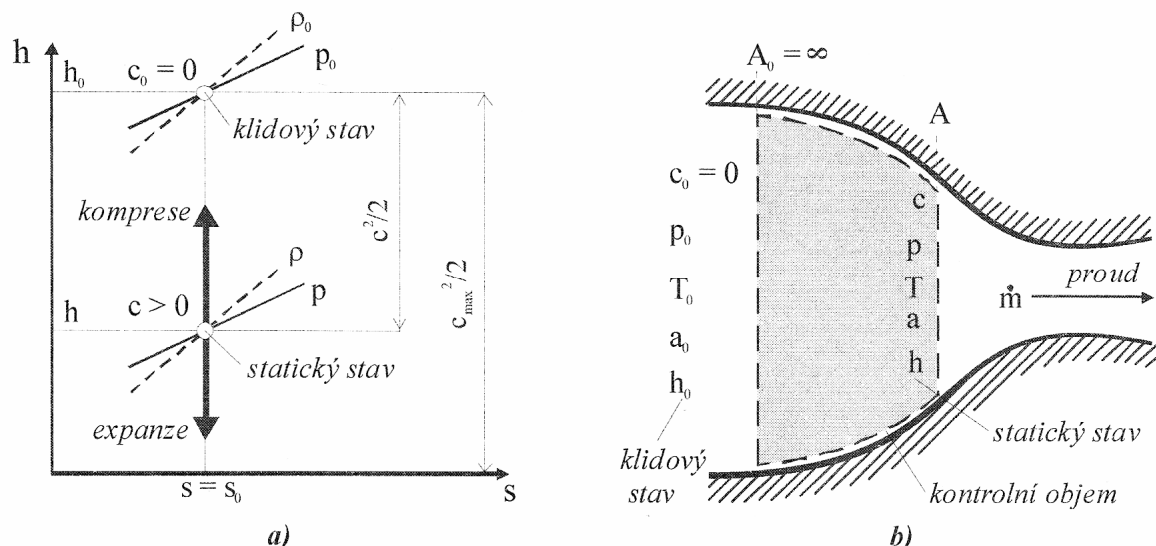
Obr. 2.2 Šíření zvuku ze zdroje, který se pohybuje různou rychlostí [2].

2.2 Princip trysky kombinovaného tvaru

Při popisu principu trysky kombinovaného tvaru je třeba vycházet z teorie proudění v kanálu s proměnným průřezem. Uvažuje se jednorozměrné stacionární izoentropické proudění ideálního plynu.

2.2.1 Jednorozměrné izoentropické proudění

Na obr. 2.3 je znázorněna v diagramu entalpie-entropie (h - s diagram) změna stavu při izoentropickém proudění a kontrolní objem, ze kterého se vychází. Je zde také vyznačen klidový stav, jež je definován nulovou rychlostí prostředí $c_0=0$.



Obr. 2.3 Diagram h - s a kontrolní objem pro jednorozměrné izoentropické proudění [2].

Z obr.2.3 lze za použití energetické rovnice ve tvaru (2.9a) a Poissonových vztahů (2.14) pro izoentropickou změnu stavu ideálního plynu odvodit vztah pro rychlost po izoentropické expanzi nebo kompresi (2.15). Předpokládá se výtok plynu z nádoby s klidovým stavem p_0 , T_0 a $c_0=0$ do prostředí s tlakem nižším než p_0 .

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\kappa = \left(\frac{v_0}{v} \right)^\kappa = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (2.14)$$

$$c = \sqrt{2(h_0 - h)} = \sqrt{2c_p(T_0 - T)} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} r T_0 \left(1 - \frac{T}{T_0} \right)} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} r T_0 \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \quad (2.15)$$

Rovnice (2.15) se nazývá Saint-Venantova-Wantzelova.

2.2.2 Kritický stav

Pokud někde v kanálu nastane stav, kdy je rychlost pohybujícího se plynu stejná jako rychlost zvuku v daném místě ($M=1$), dochází k tzv. kritickým podmínkám (nebo kritickému proudění). Veličiny popisující tento stav se označují indexem kr . Vztah pro kritickou rychlost zvuku závisící pouze na počátečních podmínkách (2.16) vychází ze Saint-Venantovy-Wantzelovy rovnice (2.15) a vztahu pro výpočet rychlosti zvuku (2.13).

$$c_{kr} = a_{kr} \Rightarrow \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} r (T_0 - T_{kr})} = \sqrt{\kappa r T_{kr}} \Rightarrow a_{kr} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} r T_0} \quad (2.16)$$

Dalšími úpravami z tohoto vztahu získáme kritický poměr teplot, a aplikací Poissonových vztahů, i tlaku a hustoty (2.17). Při návrhu trysek je důležitý především kritický tlakový poměr, který má pro $\kappa=1,4$ hodnotu 0,5283.

$$\begin{aligned}\frac{T_{kr}}{T_0} &= \frac{2}{\kappa+1}, \\ \frac{p_{kr}}{p_0} &= \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}, \\ \frac{\rho_{kr}}{\rho_0} &= \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}.\end{aligned}\tag{2.17}$$

2.2.3 Hmotnostní tok

Pro výpočet hmotnostního toku zužující se tryskou platí Fliegnerův vzorec ve tvaru (2.18), kde ψ je průtokový součinitel, který postihuje vliv stlačitelnosti a jeho maximální hodnota je při kritickém proudění $\psi_{max}=0,4842$ pro $\kappa=1,4$. Dosadí-li se do (2.18) ψ_{max} a kritický průřez, vypočítaný hmotnostní tok bude maximální jakého lze pro daný případ dosáhnout.

$$\dot{m} = A \psi p_0 \sqrt{\frac{2}{r T_0}},\tag{2.18}$$

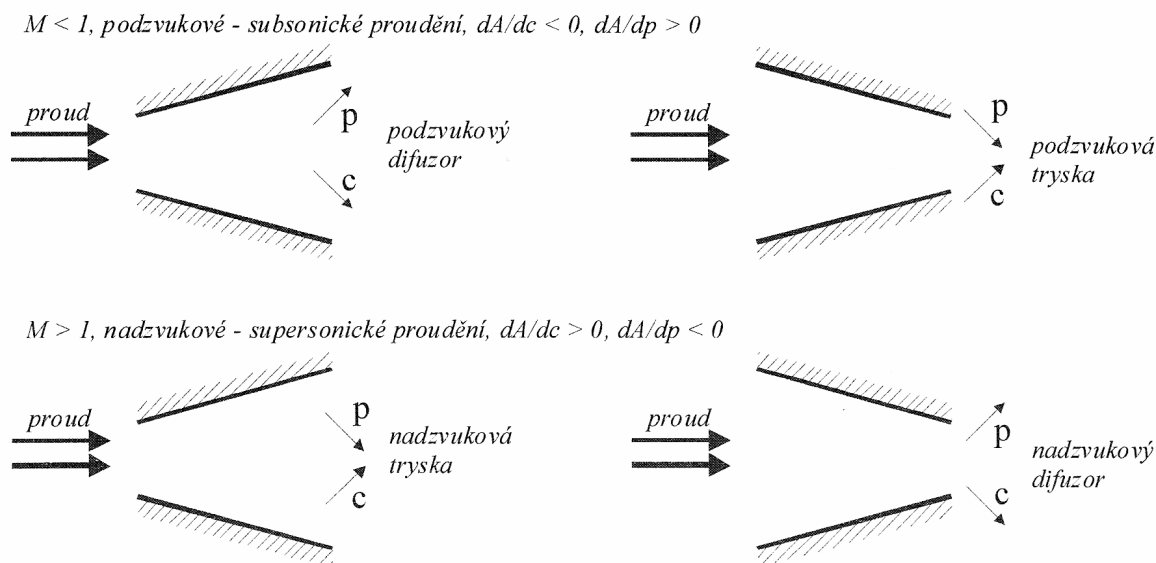
$$\psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left[\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]}\tag{2.19}$$

2.2.4 Rozdíl mezi nadzvukovým a podzvukovým prouděním

Z rovnice kontinuity (2.7), pohybové rovnice (2.8), energetické rovnice (2.1.3), bilance entropie (2.9) a Poissonových vztahů (2.14) lze odvodit Hugoniotovu rovnici (nebo také identifikační rovnici)

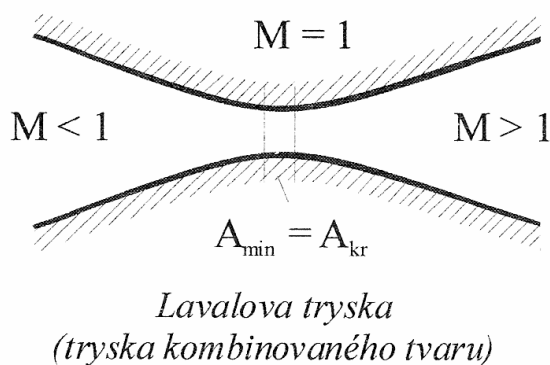
$$\frac{dA}{A} = (M^2 - 1) \frac{dc}{c},\tag{2.20}$$

která reprezentuje vztah mezi změnou průřezu a změnou rychlosti v závislosti na Machově čísle. Z rovnice (2.20) je zřejmé, že při podzvukovém proudění ($M<1$), je levá strana rovnice záporná, tudíž zmenšení průřezu vede ke zvýšení rychlosti. Naopak při $M>1$ jsou obě strany rovnice kladné, proto ke zvýšení rychlosti vede zvětšení průřezu. Názorně je toto ukázáno na obr. 2.4.



Obr.2.4 Závislost změny rychlosti a tlaku na průřezu při podzvukovém a nadzvukovém proudění [2].

Tohoto jevu se využívá pro urychlení proudu plynu do nadzvukových rychlostí (popř. zpomalení z nadzvukové rychlosti do podzvukové). Tryska kombinovaného tvaru se tedy skládá z podzvukové (zužující se) části a supersonické (rozšiřující se) trysky, jak je vidět na obr. 2.5. V nejužší části, hrdle, nastávají kritické podmínky proudění (viz odstavec. 2.2.2).



Obr. 2.5 Tryska kombinovaného tvaru [2].

2.3 Kolmá rázová vlna

Rázovou vlnou se rozumí skoková změna (odehrává se na dráze řádově 10^{-7} m) stavových veličin a rychlosti proudícího plynu. Jedná se o kompresní neizentropický děj. Zároveň je disipativní (nevratný), jelikož opačný děj, založený na expanzi, není v ideálních plynech možný.

Při početním řešení rázové vlny předpokládáme skokovou změnu veličin, to znamená, že průřez se nemění ($A=\text{konst.}$). Vychází-li se z rovnice kontinuity (2.7), rovnice pohybové (2.8), energetické rovnice (2.9) a zákona o entropii (2.10) je možné pro ideální plyn získat analytické řešení pomocí dvou rovnic, kde index y značí veličiny před rázovou vlnou a x je pro veličiny za rázovou vlnou. První z nich je Prandtlova rovnice.

$$c_y c_x = a_{kr}^2 \quad (2.21)$$

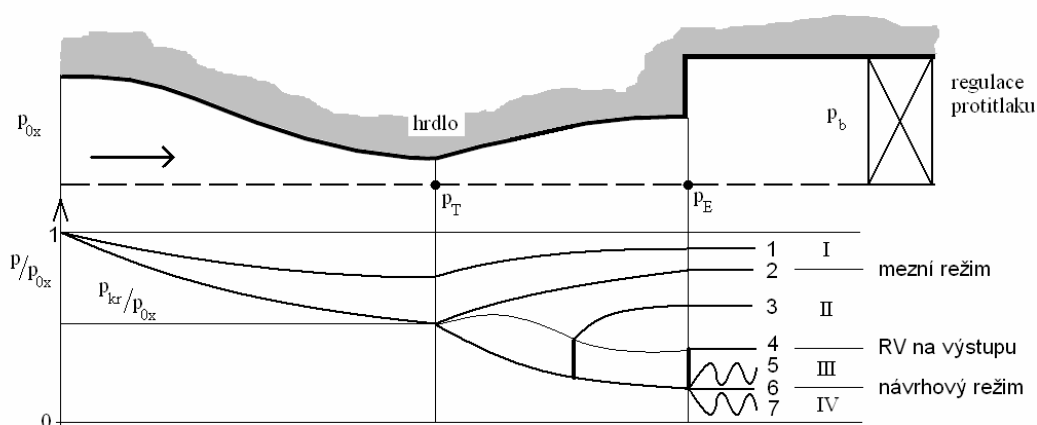
Protože je klidová entalpie (a tím i klidová teplota) před a za rázovou vlnou stejná, může se rovnice (2.21) vyjádřit pomocí Lavalových čísel

$$\lambda_y \lambda_x = 1. \quad (2.22)$$

Druhá rovnice popisující chování rázové vlny v ideálním plynu, konkrétně vztah mezi hustotou a tlakem, je Rankinova – Hugoniotova rovnice.

$$\frac{p_y - p_x}{\rho_y - \rho_x} = \kappa \frac{p_y + p_x}{\rho_y + \rho_x} \quad \text{nebo} \quad \frac{\rho_y}{\rho_x} = \frac{(\kappa + 1) \frac{p_y}{p_x} + (\kappa - 1)}{(\kappa - 1) \frac{p_y}{p_x} + (\kappa + 1)} \quad (2.23)$$

2.4 Režimy trysky kombinovaného tvaru



Obr. 2.6 Rozložení tlaku v trysce kombinovaného tvaru při různých režimech [3].

Mění-li se poměrný protitlak $\frac{p_b}{p_0}$ u Lavalovy trysky s konstantní geometrií, mění se i charakter proudění v trysce a za touto tryskou – mluví se o režimech trysky. Rozeznávají se 4 skupiny režimů a 3 hraniční režimy mezi těmito

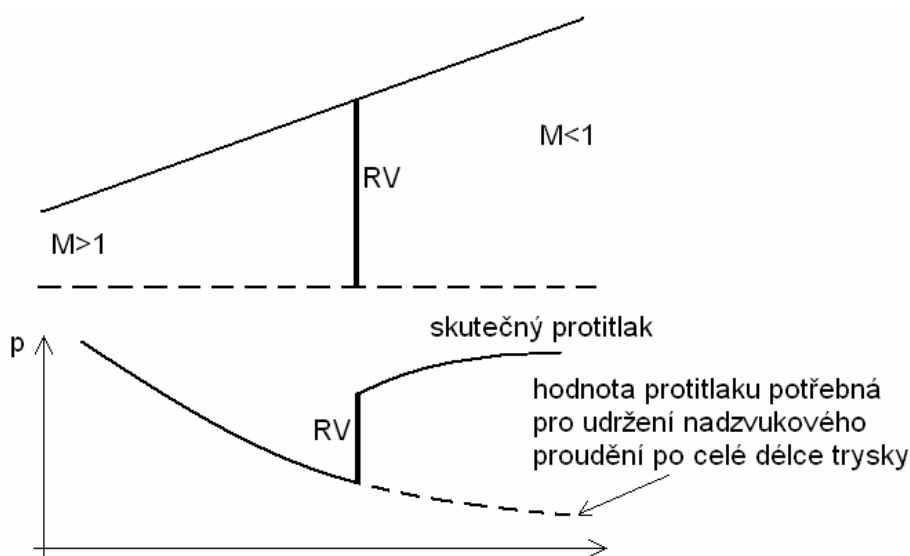
skupinami. Na obr. 2.6 jsou režimy znázorněny na diagramu poměru tlaku ku klidovému tlaku před rázovou vlnou p/p_{0x} v závislosti na podélné souřadnici trysky.

2.4.1 Mezní režim

Poměr protitlaku ku klidovému je přesně takový, že v hrdle trysky nastávají kritické podmínky, ale proud v celé trysce zůstává subsonický. Kvůli kritickému proudění nastává aerodynamické ucpání, což znamená, že je dosaženo maximálního hmotnostního toku – další snižování protitlaku nemá na hmotnostní tok žádný vliv.

2.4.2 Režimy s rázovou vlnou v nadzvukové části trysky

Protitlak je nižší než mezní, ale ne dostatečně nízký, aby se nadzvukové proudění udrželo v celé délce trysky. Vytvoří se rázová vlna tak, aby se kompresí za vlnou vyrovnaly tlaky, jak je vidět na obr. 2.7. a obr. 2.6 režim 3.



Obr. 2.7 Kolmá rázová vlna v nadzvukové části trysky.

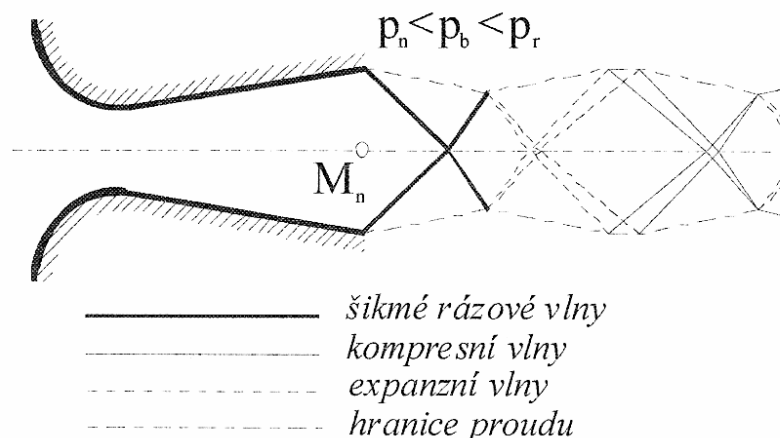
Rázová vlna v rozšiřujícím se kanále je stabilní, protože změna protitlaku vyvolá odpovídající posun vlny do nové stabilní pozice.

2.4.3 Režim s rázovou vlnou ve výstupním průřezu trysky

Je to pouze zvláštní případ předchozích režimů s rázovou vlnou uvnitř trysky. Rázová vlna se nevytvoří uvnitř trysky, ale přímo na jejím výstupním okraji (viz obr. 2.6 režim 4).

2.4.4 Režimy přeexpandovaného proudu

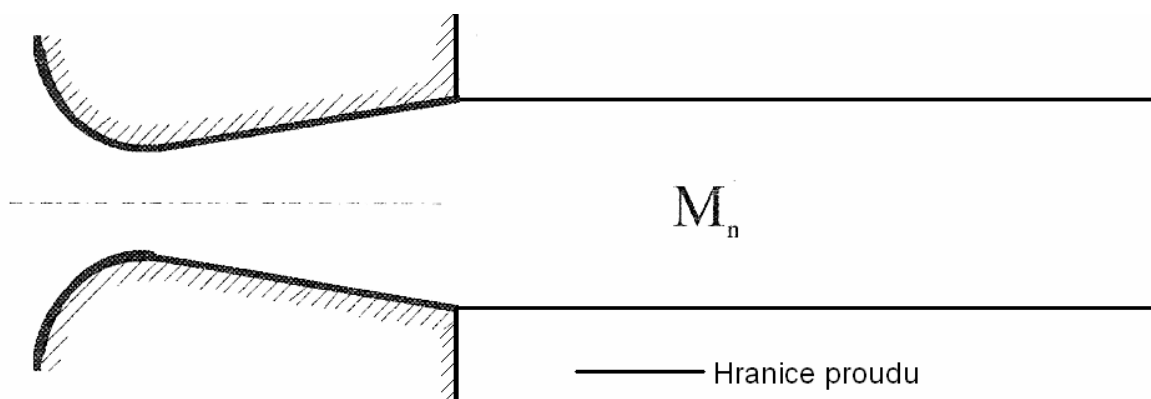
Tento režim nastane, pokud protitlak klesne pod režim rázové vlny na výstupu, ale bude vyšší než návrhový režim. Proud byl v trysce expandován na nižší tlak než je protitlak, a je tedy potřeba šikmých rázových vln aby se vyrovnal statický tlak uvnitř proudu z trysky a v jeho okolí (obr.2.8). Dále pak následují periodicky se opakující expanzní a kompresní vlny.



Obr. 2.8 Přeexpandovaný proud z trysky [3].

2.4.5 Návrhový režim

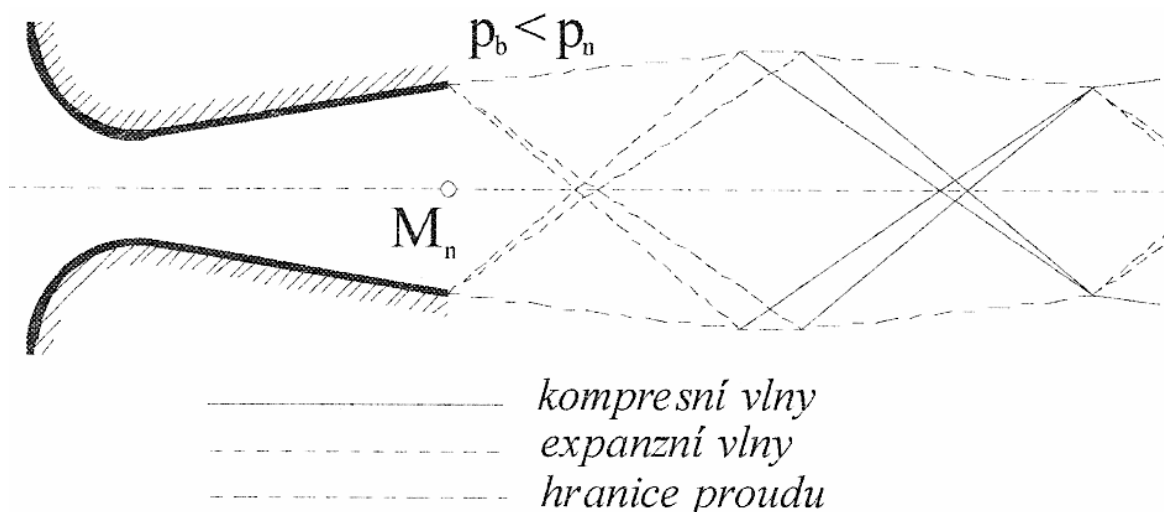
Při návrhovém režimu má proud stejný rozměr jako výstup trysky, nejsou v něm kompresní, expanzní ani rázové vlny. Od výstupu dál po proudě je Machovo číslo uvnitř proudu rovno návrhovému, které se počítá z poměru průřezů (obr. 2.9)



Obr. 2.9 Návrhový režim.

2.4.6 Režimy podexpandovaného proudu

Klesne-li protitlak pod návrhový, dojde za ústím trysky k další expanzi proudu až do vyrovnání statických tlaků. Část hranice proudu pak slouží jako prodloužení původní Lavalovy trysky. Stejně jako u přeexpandovaného proudu i zde se vyskytují periodicky se opakující expanzní a kompresní vlny (obr. 2.10).



Obr. 2.10 Podexpandovaný proud [3].

2.5 Dynamické funkce proudění ideálního plynu

Některé problémy je nutno řešit iteračními technikami při kterých je vhodné mít všechny rovnice závislé jen na jednom parametru. Proto se používají aerodynamické (dynamické) funkce závislé pouze na Machově čísle a izoentropickém exponentu κ , který je konstantní. Dynamické funkce lze sestavit jak pro izoentropické proudění tak pro rázovou vlnu. Pro izoentropické proudění to jsou funkce tlaku (2.24), teploty (2.25), hustoty (2.26), kritického průřezu (2.27) a převod mezi bezrozměrnou rychlostí a Machovým číslem (2.28).

$$\frac{p}{p_0} = \left[1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right]^{\frac{\kappa}{1 - \kappa}}, \quad (2.24)$$

$$\frac{T}{T_0} = \left[1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right]^{-1}, \quad (2.25)$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left[1 + \frac{\kappa - 1}{2} M^2 \right]^{\frac{1}{1 - \kappa}}, \quad (2.26)$$

$$\frac{A}{A_{kr}} = \frac{1}{M} \left[\left(\frac{2}{\kappa+1} \right) \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}}, \quad (2.27)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{(\kappa+1)M^2}{(\kappa-1)M^2 + 2}}. \quad (2.28)$$

U kolmé rázové vlny jde většinou o poměr hodnot před vlnou (index x) a za vlnou (index y). Jsou to funkce pro Machovo číslo za vlnou (2.29), teplotu (2.30), tlak (2.31), hustotu (2.32) a poměr klidových tlaků (2.33).

$$M_y = \sqrt{\frac{1 + \frac{\kappa-1}{2} M_x^2}{\kappa M_x^2 - \frac{\kappa-1}{2}}}, \quad (2.29)$$

$$\frac{T_y}{T_x} = \left[1 + \frac{2\kappa}{\kappa+1} (M_x^2 - 1) \right] \frac{2 + (\kappa-1)M_x^2}{(\kappa+1)M_x^2}, \quad (2.30)$$

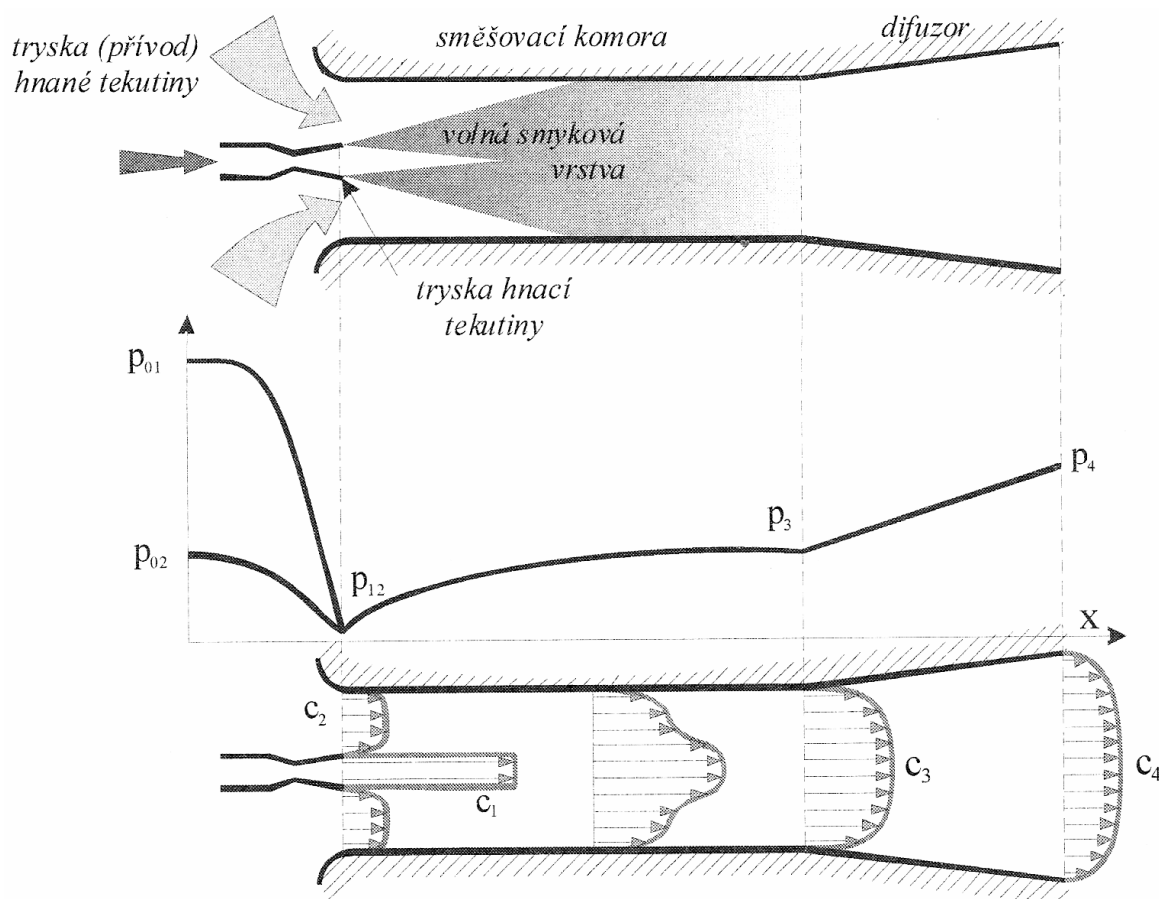
$$\frac{p_y}{p_x} = 1 + \frac{2\kappa}{\kappa+1} (M_x^2 - 1), \quad (2.31)$$

$$\frac{\rho_y}{\rho_x} = \frac{(\kappa+1)M_x^2}{2 + (\kappa-1)M_x^2}, \quad (2.32)$$

$$\frac{p_{0y}}{p_{0x}} = \frac{\rho_{0y}}{\rho_{0x}} = \left[\frac{(\kappa+1)M_x^2}{2 + (\kappa-1)M_x^2} \right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \left[\frac{\kappa+1}{2\kappa M_x^2 - (\kappa-1)} \right]^{\frac{1}{\kappa-1}}. \quad (2.33)$$

2.6 Ejektory

Ejektor, nebo také proudové zařízení, slouží k nasávání nízkotlakého plynu pomocí vysokotlakého. V ejektoru nejsou žádné pohyblivé součásti podílející se na sdílení energie mezi proudy, k tomu dochází přímým předáním části energie z hnacího plynu hnanému při procesu směšování. Na obr. 2.11 je jedno z možných konstrukčních řešení, průběh tlaku a rozložení rychlosti v plynovém ejektoru.



Obr.2.11 Konstruktivní schéma, průběh tlaku a rozložení rychlostí v plynovém ejektoru [2].

Na výstupu z hnací trysky je tlak mnohem nižší než klidový tlak hnacího plynu (viz podkapitola 2.4 a rovnice (2.15)). Při vhodné konstrukci je tento tlak nižší než klidový tlak hnaného proudu a tím dojde k nasátí do směšovací komory. Tomu také napomáhá přenos kinetické energie mezi proudy vlivem vazkosti tekutin. K tomu dochází ve směšovací části ejektoru kde se také vyrovnává rychlostní profil. Za směšovací část se umísťuje difuzor kde se kinetická energie proudu mění zpět na tlakovou, čímž stoupne tlak na hodnotu p_4 čímž se zvyšuje jinak nízká účinnost ejektorů.

Uvedené výpočty pro směšování platí za předpokladů rovnosti izobarických tepelných kapacit c_p a izoentropických exponentů κ . Nejdůležitější vztahy pro ejekční součinitel (2.34) jsou aerodynamická funkce hustoty toku hmotnosti (2.35) a vztahy pro výpočet tlaku (2.36) a teploty (2.37) na konci směšovací komory. Index 1 označuje veličiny hnacího proudu a index 2 hnaného. Index 3 značí veličiny na konci směšování.

$$\Gamma = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} = \frac{1}{\mu} \frac{p_{02} q(\lambda_2)}{p_{01} q(\lambda_1)} \sqrt{\frac{1}{\Theta_{21}}} \quad (2.34)$$

Kde $\Theta_{21}=T_{02}/T_{01}$ je poměr klidových teplot a $\mu=A_1/A_2$ je poměr průtočných průřezů obou vstupních trysek.

$$q(\lambda) = \left(1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \left(\frac{\kappa+1}{2}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \lambda, \quad (2.35)$$

$$p_{03} = p_{01} \frac{\sqrt{(1+\Gamma)(1+\Gamma\Theta_{21})}}{1 + \frac{p_{01}}{p_{02}} \Gamma \sqrt{\Theta_{21}} \frac{q(\lambda_1)}{q(\lambda_2)}} \frac{q(\lambda_1)}{q(\lambda_3)}, \quad (2.36)$$

$$T_{03} = T_{01} \frac{1 + \Gamma\Theta_{21}}{\Gamma + 1}. \quad (2.37)$$

2.7 Metoda charakteristik

Metoda charakteristik se používá v matematice k řešení parciálních diferenciálních rovnic druhého řádu hyperbolického typu. Charakteristiky zde představují plochy (křivky), které jsou integrály charakteristické rovnice. Podél charakteristik platí invariantní vztahy pro řešení parciální diferenciální rovnice [4].

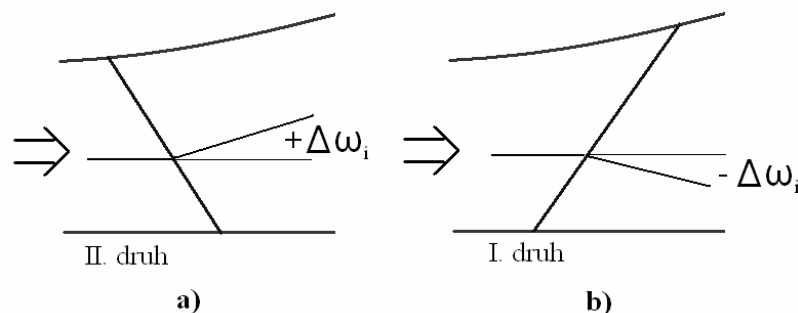
V řešené oblasti se předpokládá platnost linearizované potenciální rovnice ve tvaru

$$(1 - M^2) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (2.38)$$

a zároveň, že $M > 1$. Pro metodu charakteristik se zanedbává vliv vazkosti a předpokládá se konstantní hodnota expanzního součinitele κ . Charakteristikami pro vztah (2.38) je rovnice

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{\pm \sqrt{M^2 - 1}}, \quad (2.39)$$

kde „+“ platí pro charakteristiku I. druhu a „-“ pro charakteristiku II. druhu (viz obr. 2.12).



Obr. 2.12 Druhy expanzních vln – a) charakteristika II. druhu – b) charakteristika I. druhu.

Funkce 2.40 se nazývá Prandtlova-Meyerova funkce a fyzikální smysl má pro $\lambda > 1$, resp. $M > 1$.

$$\omega(\lambda) = \sqrt{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}} \arctg \sqrt{\frac{\kappa-1}{\kappa+1} \frac{\lambda^2-1}{1-\frac{\kappa-1}{\kappa+1}\lambda^2}} - \arctg \sqrt{\frac{\lambda^2-1}{1-\frac{\kappa-1}{\kappa+1}\lambda^2}} \quad (2.40)$$

Tato funkce je základní rovnicí pro metodu charakteristik, kde $\omega(\lambda)$ má význam úhlu, o který by se musel při prosté expanzi proud odklonit, aby rychlost stoupla z $\lambda_0=1$ na λ .

V numerickém řešení se spojitě pole charakteristik nahrazuje sítí vln, čímž se problém diskretizuje. Což znamená, že čím menší krok (intenzitu) zvolíme tím přesnějšího výsledku dosáhneme, obvykle se volí $\Delta\omega=0,6-1,5^\circ$, v okolí zvukové čáry se $\Delta\omega$ volí i menší ($0,3^\circ$). Tato doporučení platí pro ruční postup a jedná se o kompromis mezi rychlostí a přesností.

Další vztahy potřebné pro numerické řešení jsou uvedeny v podkapitole 5.1.

3. Experimentální metody

3.1 Šlírová zobrazovací metoda

Pro zobrazení proudového pole je využívána šlírová zobrazovací metoda. Ta využívá změn indexu lomu při změnách hustoty media. Tato změna však musí být značná, aby došlo k výrazné změně směru paprsků světla a tím k viditelným změnám osvětlení stínítka. Proto jsou tyto metody vhodné pro stlačitelné proudění ($M > 0,3$), mezní vrstvy, směšování a proudění s teplotními rozdíly. Hlavní výhody této metody je:

- neovlivňuje probíhající děj
- lze zachytit celé sledované pole najednou (neměří v bodě ale v ploše)
- nemá žádnou setrvačnost (lze ji použít pro zobrazení nestacionarit)

Nevýhody:

- jelikož výsledný paprsek dopadající na stínítko je ovlivněn všemi jevy při průchodu proudem (integrální charakter) lze ji použít jen pro 2D případy
- je obtížné ze zobrazeného výsledku určit přesné hodnoty tlaku, či jiných veličin. Používá se proto spíše k získání celkového přehledu o charakteru proudění ve zkoumané oblasti (kvalitativní vyhodnocení).

3.1.1 Princip šlírové metody

Základní zákony využívané při těchto metodách jsou především index lomu

$$n_i = \frac{c_0}{c}, \quad (3.1)$$

kde c_0 je rychlost světla ve vakuu a c je rychlost světla v prostředí. Pro plyny s n blízké jedné platí

$$n_i = 1 + K\rho, \quad (3.2)$$

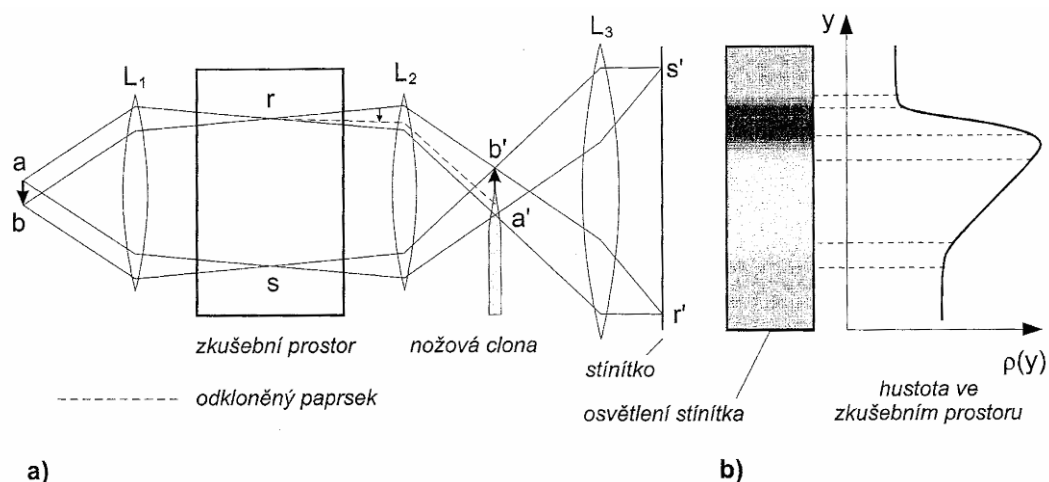
kde K je Gladstone-Daleova konstanta [m^3/kg] a ρ je hustota plynu. Pro úhel odklonu paprsků platí

$$\Delta\alpha = -\frac{L}{n_i} K \frac{d\rho}{dy}, \quad (3.3)$$

když L je délka dráhy ve zkušebním prostoru a y je směr změny hustoty.

Pro zobrazení touto metodou vytváříme optickou dráhu s několika ohnisky a odrazy. Je velmi rozšířená, jelikož konstrukce samotného měřicího prostoru není

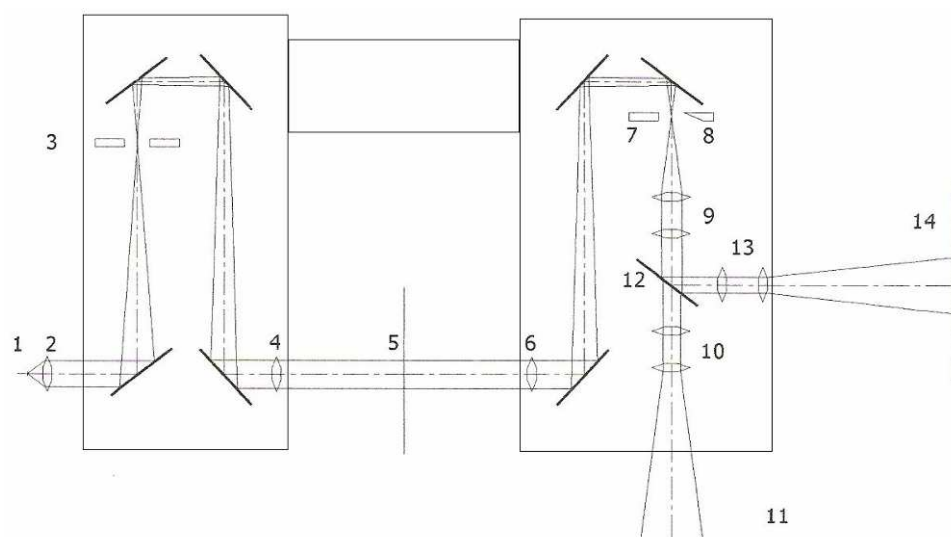
tak náročná na přesnost (tedy drahá) jako u interferenční metody a přesto nám poskytne mnoho informací o proudění, jelikož je citlivá na gradient hustoty (viz obr. 3.1).



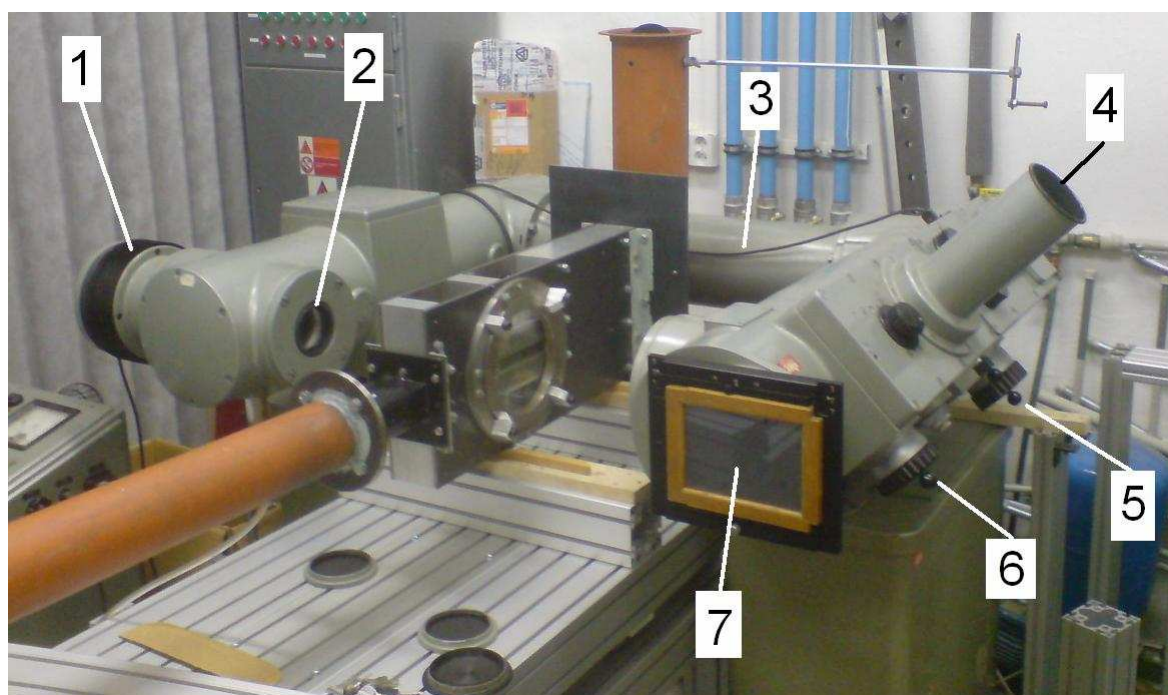
Obr. 3.1 a) základní schéma šlírové metody b) osvětlení stínítka v závislosti na změnách hustoty v měřícím prostoru [4].

Důležitou součástí šlírového měřícího přístroje je nožová clona, jejíž nastavení rozhoduje o zobrazených výsledcích. Budeme-li se držet obr. 3.1 kde je tato clona nastavena přibližně do poloviny paprsku, zobrazí se nám při konstantní hustotě šedé stínítko, pokud se v místě „r“ bude nacházet změna hustoty, ohne se paprsek buď tak, že ho více dopadne na clonu a tudíž stínítko ztmavne (kladný gradient hustoty) nebo naopak menší část bude clonou odstíněna a stínítko zesvětlá (záporná změna hustoty). Proto pokud nastavíme clonu moc vysoko, bude celé stínítko tmavé a jen ty největší gradienty se zobrazí, pokud však clonu umístíme příliš nízko, bude celý obraz přesvícený a opět nebude téměř nic vidět.

Šlírová metoda se nejčastěji užívá pro získání základních poznatků o proudění, jako jsou rázové vlny, oblasti expanze a komprese, úplavy a mezní vrstvy. Měřením odstínů šedi a tloušťek jednotlivých pruhů lze také určit konkrétní hodnoty, ale přesnost tohoto postupu je sporná především vzhledem k různorodosti nastavení nožové clony a dalších komponent měřícího přístroje. Pokud by i přesto byla snaha takto analyzovat výsledný obraz, je potřeba udělat referenční snímek, kdy se ve sledované oblasti nic neděje – homogenní hustotní pole. Na obr. 3.2 je schéma šlírového přístroje Zeiss 80, který je k dispozici v laboratořích KEZ.

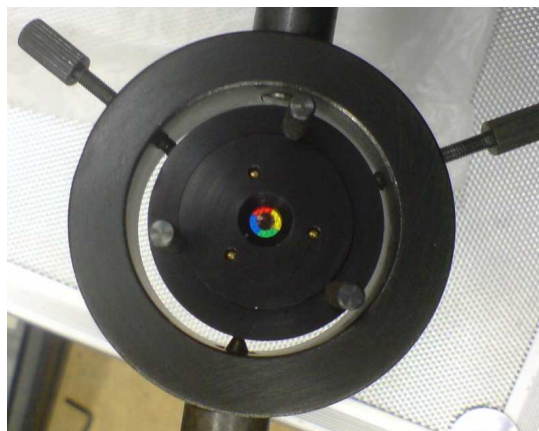


Obr. 3.2 Šlírový přístroj Zeiss 80. 1- vysokotlaká rtuťová výbojka, 2 – kondensor, 3 – štěrba ležící v ohnisku 1. hlavní čočka, 4 – 1. hlavní čočka, 5 – měřicí prostor, 6 – 2. hlavní čočka, 7,8 – nožová clona v ohnisku druhé hlavní čočky, 9,10 - objektivy pro zobrazení na matnici 11 (pro umístění fotoaparátu), 12 – sklopné zrcátko pro zobrazení na pozorovacím stínítku 14, 13- objektiv [5].



Obr. 3.3 Fotografie přístroje Zeiss 80. 1- vysokotlaká rtuťová výbojka, 2 – 1. hlavní čočka, 3- zadní výztuha rámu, 4-pozorovací stínítko, 5-ovládání natočení nožové clony, 6-ovládání výšky nožové clony, 7- matnice pro umístění fotoaparátu.

Výše popsaný způsob zobrazuje pouze tmavé a světlé proužky, ale je možno jednoduchými úpravami získat i barevný šlírograf. Je nutno nahradit nožovou clonu barevným filtrem s neprůhledným středem (viz obr. 3.4).



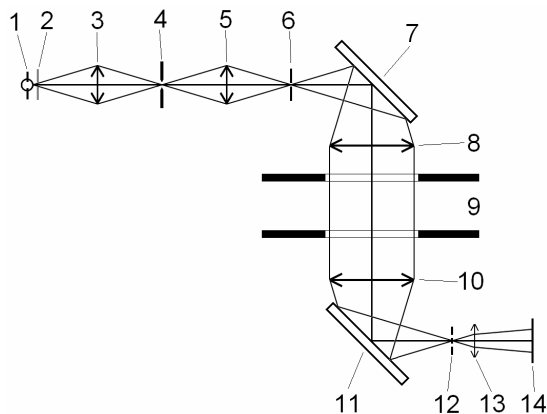
Obr. 3.4 Filtr pro barevné zobrazení šlířů.

Zobrazený filtr přebírá úlohu nožové clony tím, že při nulových změnách hustoty dopadá většina světla na střední část filtru, pokud dojde k vychýlení paprsku světla vlivem gradientu hustoty, projde více světla jednou z barev a ta je pak zobrazena na stínítku. Střední část je možno natáčet a tím měnit barvy pro kompresi a expanzi, nebo pootočením o 45° změnit směrovou citlivost na změnu hustoty (podobně jako u nožové clony).

Protože je clona kruhová, je potřeba, aby i štěrba byla kruhová, resp. aby řez světla dopadající na filtr byl kruhový. Toho je docíleno dvojitou irisovou clonkou umístěnou v ohnisku první hlavní čočky. Clonka slouží k nastavení množství světla dopadajícího na stínítko bez gradientu hustoty v měřicím prostoru. Tím přebírá možnost nastavení výšky nožové clony u černobílého šlírového přístroje.

Šlírový přístroj v Novém Kníně je stavebnicově poskládaný na optické lavici. Jako zdroj světla slouží rtuťová výbojka, ale při expozici na fotoaparát přebírá její úlohu jiskrový generátor. Díky výbojce je možno na stínítku průběžně sledovat děje v měřicím prostoru a nastavit optické prvky do správné polohy, ale při pořizování snímku je potřeba krátká expozice aby nestacionarity v proudění byly na fotografii ostré. K tomuto účelu se používá jiskrový generátor poskytující silný, ale krátký záblesk. Použitý jiskrový generátor vytváří záblesk trvající řádově 10^{-6} s. Generátor musí mít elektrody v ohnisku první čočky aby při záblesku nebyl obraz rozmazaný a využil se celý výkon jiskry. V ohnisku druhé čočky je potom umístěna nastavitelná dvouirisová clonka, kterou se nastavuje množství světla dopadající na

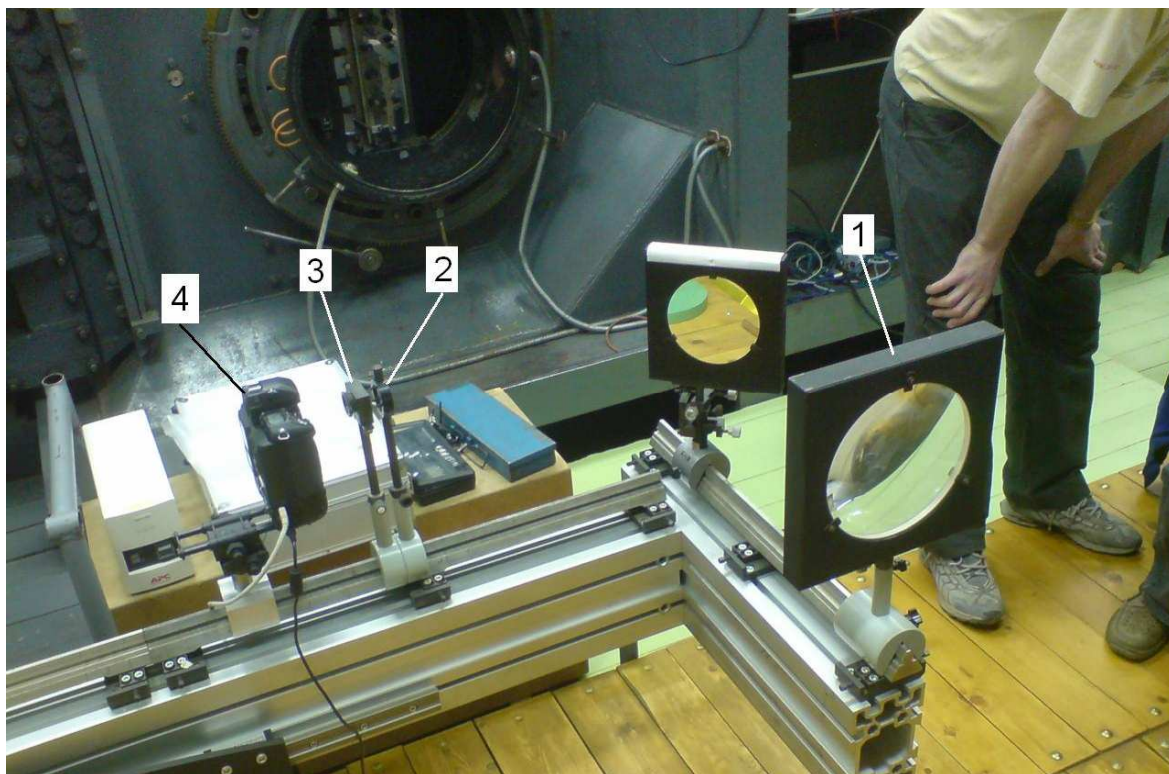
střed barevného šlírového filtru. Po odrazu od zrcadla prochází světlo první hlavní čočkou, za níž již jsou paprsky rovnoběžné a prochází měřicím prostorem. V ohnisku druhé hlavní čočky je umístěn barevný šlírový filtr, za nímž následuje objektiv se stínítkem nebo fotoaparátem. Celé schéma je na obr. 3.5. Na obr. 3.6 a obr. 3.7 jsou fotografie sestaveného šlírového zařízení.



Obr. 3.5 Schéma barevného šlírového přístroje použitého při experimentu. 1-rtuťová výbojka, 2-Mechanická záklopka a pevná clona, 3-první čočka, 4-jiskrový generátor, 5-druhá čočka, 6-dvouirisová clonka, 7-první zrcadlo, 8-první hlavní čočka, 9-měřicí prostor, 10-druhá hlavní čočka, 11-druhé zrcadlo, 12-barevný filtr, 13-objektiv fotoaparátu, 14-fotoaparát.



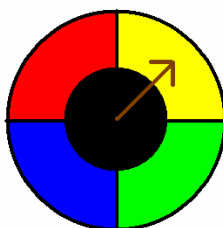
Obr. 3.6 Osvětlovací část šlírového přístroje ústavu termomechaniky AVČR v Novém Kníně. 1-rtuťová výbojka, 2-mechanická záklopka, 3-jiskrový generátor, 4-dvouirisová clonka, 5-první hlavní čočka.



Obr. 3.7 Zobrazovací část šlírového přístroje ústavu termomechaniky AVČR v Novém Kníně. 1-druhá hlavní čočka, 2-barevný šlírový filtr, 3-čočka objektivu, 4-záznamové zařízení.

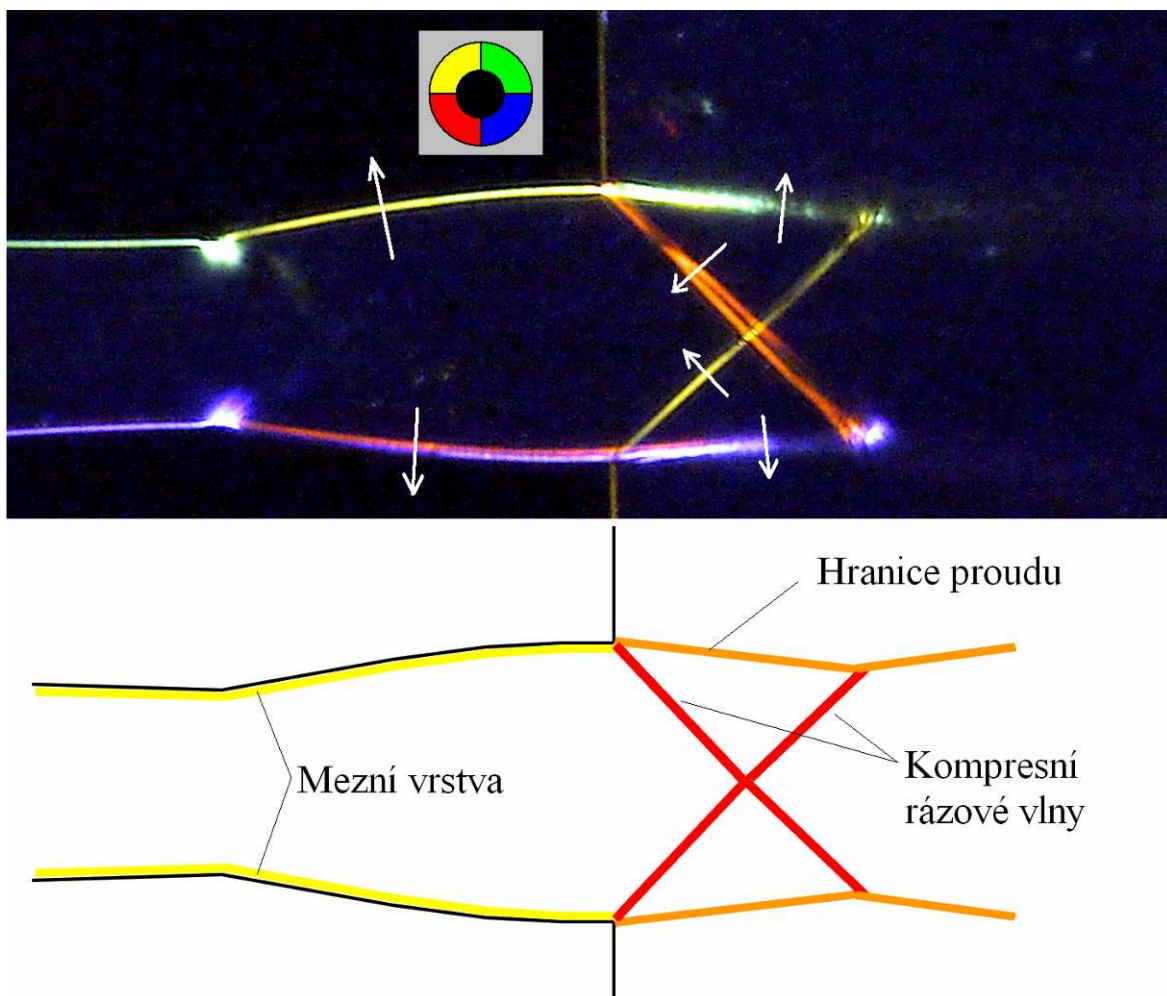
3.1.2 Čtení barevného šlírografu

Pro správné pochopení dějů, které jsou na šlírografu zachyceny, je třeba pochopit vznik jednotlivých barev. Také je důležité si uvědomit, že nejsou zobrazeny změny tlaku nebo rychlosti, nýbrž změny hustoty.



Obr. 3.8 Směr poklesu hustoty pokud je na šlírografu vidět žlutá barva, při zobrazeném natočení barevného filtru.

Z obr. 3.8 lze odvodit obecné pravidlo, že směr od středu k zobrazené barvě určuje směr největšího poklesu hustoty (kolmo k izočarám). Pokud ale je změna převážně rovnoběžná nebo naopak kolmá, pak je zobrazená barva směsí dvou barev, což je případ většiny mezních vrstev a kolmý rázových vln.



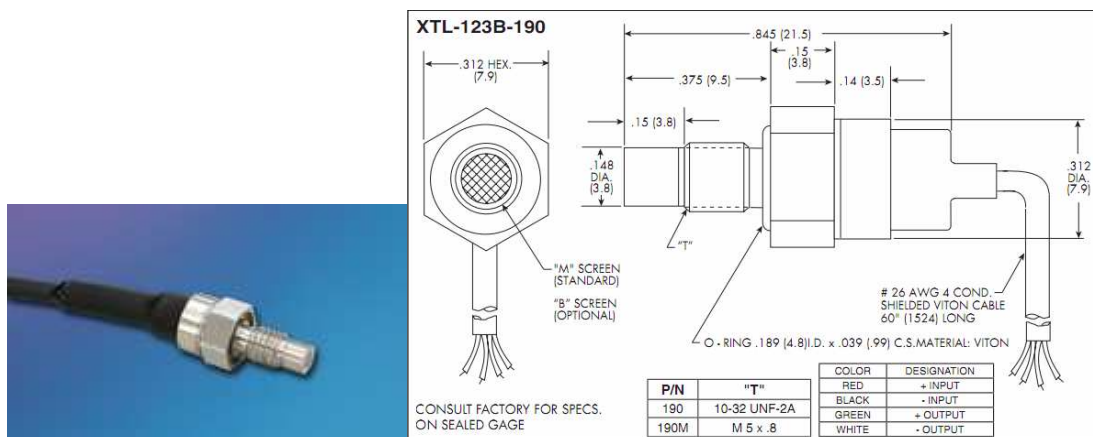
Obr. 3.9 Nahoře –obraz proudového pole na šlírovacím zařízení (bílé šipky naznačují směr poklesu hustoty), dole – schéma proudu.

Na obr. 3.9 je snímek proudu a odpovídající schéma (jedna se o přeexpandovaný proud). V mezní vrstvě klesá hustota směrem ke stěně, což je jednou směrem nahoru a podruhé dolů, proto jsou na snímku obě vrstvy jinou barvou (nahore žlutá+zelená, dole červená+modrá). Šikmé rázové vlny jsou kompresní děj, kdy je i hustota za rázovou vlnou výrazně vyšší (teplota se mění méně než tlak), dochází tedy k zobrazení šlírů. Naznačená hranice proudu je směšovací mezní vrstva v níž opět hustota klesá směrem od středu proudu.

3.2 Snímání tlaku

Při experimentálním měření byly použity čtyři snímače tlaku s analogovým výstupním signálem. Tyto snímače XTL-123B-190 firmy Kulite (obr. 3.10) mají rozsah $\pm 100\text{kPa}$, který jsou schopny (dle katalogového listu v příloze) snímat

s frekvencí více než 175kHz. Tyto snímače jsou tzv. piezorezistivní, u nichž se využívá piezorezistivního jevu. Ten spočívá ve změně měrného odporu monokrystalické křemíkové destičky při mechanickém namáhání. U těchto snímačů se obvykle používá uspořádání kde na křemíkové destičce o vysokém odporu jsou difuzí stopových prvků (akceptorů) vytvořeny vodivé cestičky uspořádané do Wheatsonova můstku. Akceptory zvýrazňují závislost odporu na namáhání až 30x [12].



Obr. 3.10 Elektronický snímač tlaku firmy Kulite [13].

Výstup snímače je řádově 100mV, pro další zpracování signálu je proto zařazen diferenciální zesilovač s výstupním napětím volitelným buď 5V nebo 10V. Byl použit zesilovač firmy Dewetron (obr. 3.11), který umožňuje zapojení až 16 snímačů najednou. Výstupní signál zesilovače je analogový, na digitální je převeden pomocí PCI karty umístěné v počítači.



Obr. 3.11 Diferenciální zesilovač firmy Dewetron řady DEWE-51-PCI-16 opatřený dvěma moduly MDAQ-SUB-BRIDGE-D.

Před samotným měřením bylo potřeba nejprve snímače kalibrovat. Kalibrace byla provedena Ing. Janem Kolářem na vybavení TUL pro přetlak. Bylo rovněž provedeno ověření linearity snímačů pro záporné hodnoty tlaku (podtlak).

3.3 Nadzvukové tunely

Aerodynamické tunely slouží obecně ke studiu proudění plynů. Předmětem studia může být buď obtékání tělesa (vnější aerodynamika) nebo proudění v kanále (vnitřní aerodynamika). Pro obojí se používají stejné typy tunelů a to pevný tunel s pevným modelem (nebo kanálem), kterým protéká plyn potřebnou rychlostí. Ovšem jednotlivé konstrukce tunelů se mohou lišit. Dají se dělit podle druhu pohonu, zda se jedná o otevřený/uzavřený oběh a velikosti Machova čísla.

3.3.1 Dělení podle Machova čísla

Z konstrukčního hlediska je rozdíl zda se jedná o podzvukové či nadzvukové proudění. Tato práce se zabývá především supersonickým prouděním, proto jsou zde ostatní druhy tunelů uvedeny pouze pro úplnost.

- | | |
|----------------|---------------|
| - subsonické | $0 < M < 0.5$ |
| - transsonické | $M \approx 1$ |
| - supersonické | $1 < M < 5$ |
| - hypersonické | $M > 5$ |

3.3.2 Provozní režim aerodynamického tunelu

U aerodynamických tunelů se rozlišuje především provozní režim.

a) Kontinuální chod

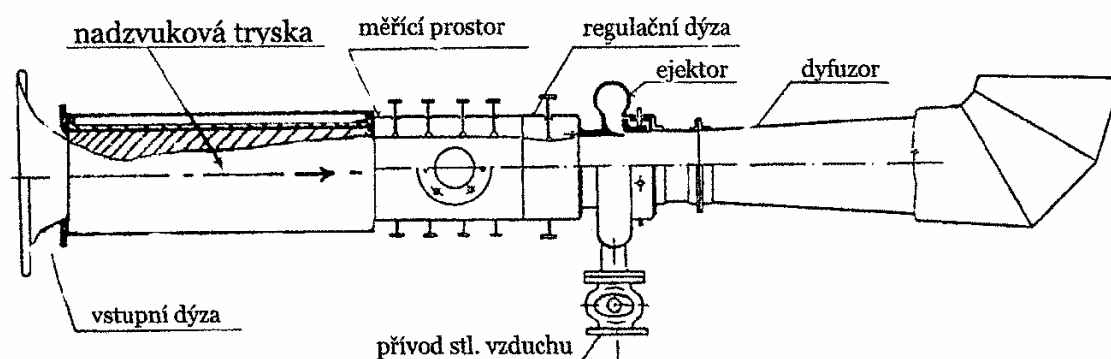
- doba jeho provozu je téměř neomezená
- je zapotřebí velmi výkonného zdroje tlaku

b) Přerušovaný chod

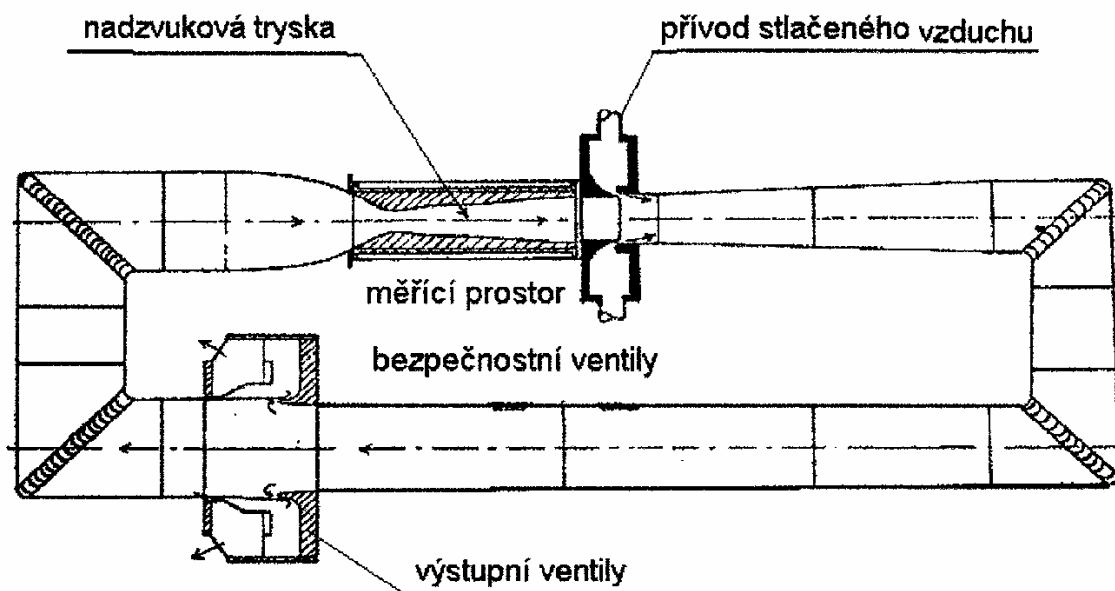
- je zapotřebí nádoba na akumulaci tlakové energie
- díky akumulaci není potřeba tak výkonný zdroj (stačí menší kompresor puštěný delší dobu)
- doba provozu je omezena kapacitou akumulace

3.3.3 Otevřený a uzavřený systém

Rozdíl mezi oběma systémy je patrný z obr. 3.10 a obr. 3.11, kde jsou schémata otevřeného a uzavřeného systému s ejektorovým pohonem (viz odstavec 3.2.4). Otevřený systém urychluje tekutinu z klidného prostředí a po protečení celým tunelem ji vypouští do okolí. Uzavřený oběh tekutinu po protečení přivádí zpět na vstup, to vede k menší spotřebě energie jelikož stačí pouze vyrovnávat energetické ztráty tekutiny (disipativní procesy). Nevýhodou uzavřeného systému je větší prostorová náročnost a pořizovací náklady.



Obr. 3.10 Otevřený supersonický tunel s ejektorovým pohonem [1].



Obr. 3.11 Uzavřený supersonický tunel s ejektorovým pohonem [1].

V některých případech je nezbytností použít uzavřený systém, např. používáme-li místo vzduchu jiný plyn (dusík, ethan, kyslík, oxid uhličitý, helium atd.) pro dosažení co nejlepší shody Reynoldsova čísla modelu s realitou.

3.3.4 Druhy pohonů

Zdrojem přetlaku a tím vyvozené rychlosti plynu může být buď tlak přivedený na vstup zatímco na výstupu je atmosférický tlak, nebo tunel saje vzduch z atmosféry a na výstupu je podtlak. Obě tyto metody mají několik konstrukčních variant.

a) Ejektor

Ejektor slouží k vytvoření podtlaku v ústí hnané trysky smíšením hnaného a hnacího proudu plynu. Pokud hnanou trysku ejektoru připojíme k výstupu z měřicího prostoru, dostaneme žádaný zdroj podtlaku. Princip, výpočet a druhy ejektorů jsou podrobněji rozebrány v podkapitole 2.6.

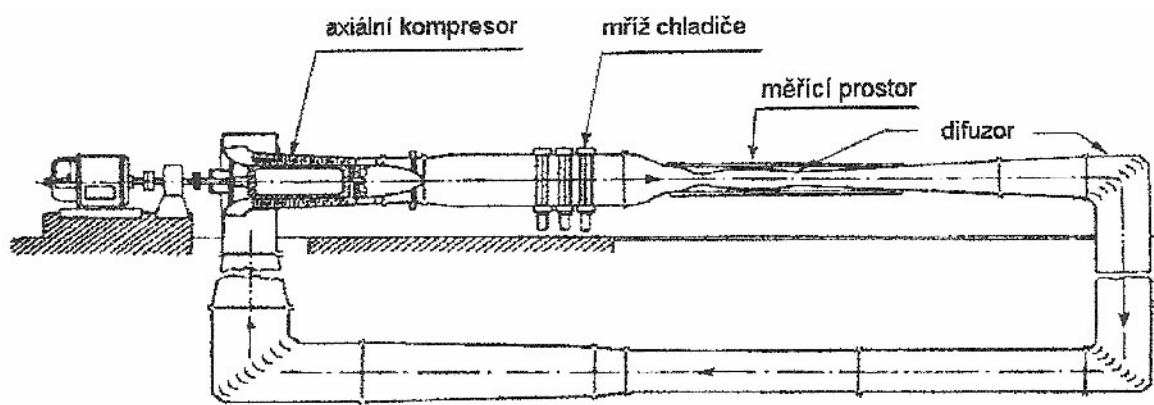
b) Podtlaková nádoba

Tento způsob se často používá v kombinaci s tlakem na vstupu, protože je obvykle obtížnější dosáhnout potřebného stupně vakua a udržet ho po dostatečně dlouhou dobu a také v potřebě velkého objemu nádoby. To ovšem neplatí v případě pracoviště ústavu termomechaniky AVČR v Novém Kníně, kde byl bývalý zlatý důl utěsněn a vznikla tak (pod)tlaková nádoba o objemu několika tisíc kubických metrů.

c) Kompresorový pohon

Lopátkového kompresoru se dá využít především u uzavřeného systému, kdy kompresor nejen vytváří přetlak na straně vstupu do měřicího prostoru, ale i podtlak na jeho výstupu. Při uvážení, že např. pro $M=2,2$ je poměr tlaků $p/p_0=0,0935$, což znamená přetlak skoro 12 atmosfér při provozu do atmosférického tlaku, může být možnost posunutí směrem k nižším absolutním hodnotám velmi vítána, vzhledem ke konstrukci ostatních součástí tunelu.

Pro velký rozsah nadzvukových rychlostí je potřeba použít kompresor s větším počtem lopatek, které lze natáčet nebo s možností by-pasu přebytečného plynu.

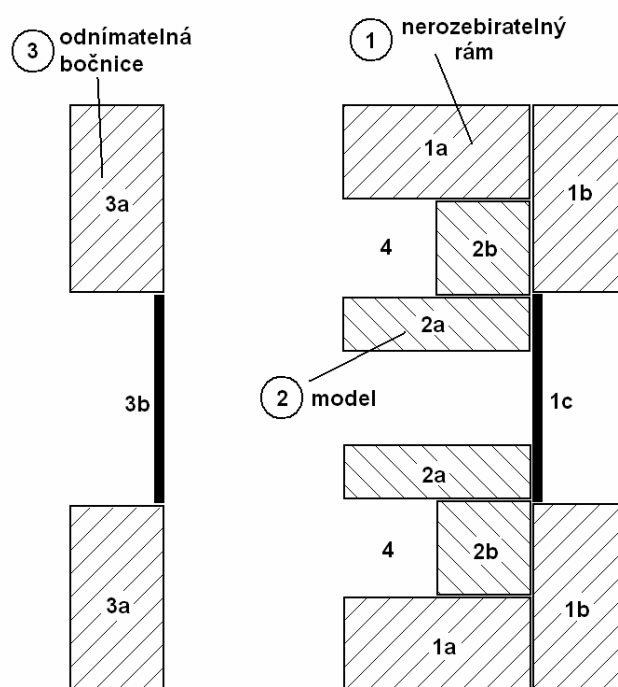


Obr. 3.12 Supersonický uzavřený tunel s kompresorovým pohonem [1].

4. Konstrukce měřicího prostoru

K dispozici je zásobník stlačeného vzduchu o tlaku 400 kPa. To by stačilo pro $M=1,56$, ale cílem je $M=2,2$. Proto je potřeba použít plynový ejektor k vyvození podtlaku na výstupu z měřicího prostoru. Protože zásobník stlačeného vzduchu má omezenou velikost a kompresor nemá dostatečný výkon pro pokrytí spotřeby ejektoru, bude aerodynamický tunel pracovat v přerušovaném režimu. Jedná se o otevřený systém, který je jednodušší na konstrukci a méně náročný na prostor. Na vstupu měřicího prostoru je tedy atmosférický tlak a nejvyšší teoreticky možný rozdíl tlaku působící na konstrukci bude 100kPa, tj. 10N/cm^2 .

4.1 Základní idea variabilního měřicího prostoru



Obr. 4.1 Schéma měřicího prostoru 1a-základní nosník, 1b-rám bočnice napevno přidělaný k základním nosníkům, 1c-sklo v pevné části rámu, 2a-model nebo tryska, 2b-lišta pro upnutí modelů, 3a-rám odnímatelné bočnice, 3b-sklo odnímatelné bočnice, 4- prostor pro snímače a kabeláž.

Nejdůležitější částí měřicího prostoru je tuhý samonosný rám, který je možno upnout na pojezdový stůl sloužící k jednoduššímu posouvání tunelu během měření. Je rozdělen na dvě části, z nichž jedna je pevná a obsahuje horní a dolní základní nosník s jednou boční stěnou (obr. 4.1-1), a druhá je snadno odnímatelná bočnice (obr. 4.1-3). Obě bočnice jsou sestaveny z rámu a skla přilepeného

tmelovým lepidlem. Pevnost spoje mezi sklem a rámem nemusí být nijak značná, naopak je výhodou pružnost spoje, protože po připojení měřicího prostoru na zdroj podtlaku dojde k přitlačení skla na model čímž se utěsní případné mezery mezi sklem a modelem.

Model je uchycen polovinou své šířky k liště (obr.4.1-2), která je přišroubována k samotnému rámu. Druhá polovina šířky modelu je využita pro umístění tlakových snímačů a vedení jejich kabeláže (obr.4.1-4) ven z měřicího prostoru.

4.2 Rozměry měřicího prostoru

Při základních úvahách o rozměrech měřicího prostoru se vycházelo z prostorových omezení daných konstrukcí šlírového přístroje ZEISS (viz obr. 3.3) a hlavně z parametrů tlakového vzduchu, který by měl sloužit jako pohon ejektoru.

Zadní výztuha optického šlírového přístroje Zeiss 80 je vzdálena 700mm od optické osy čoček. Pro maximalizaci zobrazitelného prostoru byla vybrána pevnostní skla o tloušťce 8mm a rozměru 640x100, což je tedy maximální zobrazitelný rozměr měřicího prostoru a zároveň výchozí parametr pro návrh rozměrů (především délky) rámu.

V laboratoři je umístěn experimentální ejektor pro studium dějů v ejektorech, jehož optimalizace byla součástí jiné diplomové práce [5]. Tento ejektor nebude sloužit k pohonu navrhovaného aerodynamického tunelu, ale je poháněn stejným tlakovým vzduchem. Za předpokladu, že nový ejektor sloužící jako pohon tunelu bude mít větší nebo stejnou účinnost můžeme vycházet z rozměrů stávajícího ejektoru.

Kritický průřez hnané části starého ejektoru je 80x40mm. Za předpokladu, že hmotnostní tok je limitován právě kritickým průřezem (odstavec 2.2.3), můžeme zdůvodnit volbu největšího hrdla tunelu $A_{kr,max} \leq 3200\text{mm}^2$. Kvůli nižší spotřebě tlakového vzduchu a menší energetické náročnosti při vysokých rychlostech, byl zvolen největší kritický průřez 100x25mm. Šířka 100mm je výhodná kvůli výrobním řadám profilů, z nichž jsou vyrobeny všechny modely. A také aby zobrazené proudění mělo co nejvíce charakter 2D proudění – potlačuje se tak vliv mezních vrstev u skel měřicího prostoru a jiné 3D jevy. Aby bylo možno zaměnit trysky bez nutnosti vyrábět pro každou z nich odpovídající model, je dodržen na výstupu průřez $A_E=100x25\text{mm}$. Zvolený průřez odpovídá kritickému průřezu pro Machovo

číslo=1. Pro vyšší Machova čísla bude kritický průřez dokonce menší, což snižuje energetickou náročnost pohonu. To je oproti koncepci konstantního kritického průřezu velká úspora energie, materiálu a času potřebného na výrobu a výměnu modelů.

4.3 Použité materiály

Na konstrukci rámu je použita těžká řada duralových profilů od firmy MayTec® o šířce 50mm [14]. Výhodou těžké řady je její tuhost a přesnost oproti lehké verzi. Konkrétně jsou použity profily 50x100 6E a 50x50 3E. Označení xE znamená, že profil má x drážek pro šrouby nebo matice. Právě drážky pro spojovací materiál po celé délce profilů byla klíčová vlastnost pro volbu duralových protahovaných profilů. Umožňují uchycení modelů s různými roztečemi upínacích šroubů. Také tím odpadají náklady na výrobu takovýchto drážek, zmenší se odpad a sníží pořizovací náklady (méně materiálu).

Modely jsou vyrobeny z ploché duralové tyče 20x100mm a 40x100mm. Dural byl volen pro svou nižší hmotnost při zachování dostatečně vysoké pevnosti potřebné pro provoz takového aerodynamického tunelu. Jednou z hlavních výhod je lepší, a tím i levnější, obrobitelnost elektroerozivním obráběním. Další nespornou výhodou jsou jeho antikorozní vlastnosti. Není to sice klíčová vlastnost, ale při experimentálním měření může docházet ke kondenzaci vzdušné vlhkosti na stěnách měřicího prostoru, takže není ani úplně zanedbatelná.

4.4 Použité technologie výroby

Většina obráběcích operací byla prováděna v dílně Katedry energetických zařízení na konvenčních obráběcích strojích, jako je frézka, vrtačka, soustruh a další, opatřených v některých případech číslíkovým měřením polohy.

Nastaly určité komplikace při zadávání výroby trysek. Jejich profil je dán spline funkcí a pro dodržení geometrie bylo zapotřebí dosáhnout přesnosti řádově 0,01mm na šířce 100mm. Jednou z možností je frézování a to buď řádkováním půlkulatou frézou nebo bokem válcové frézy. Obrábění řádkováním by přineslo velkou hrubost výsledného povrchu a dodatečným ručním broušením by nebyla zajištěna požadovaná přesnost. Pro obrábění bokem frézy takto širokého obrobku je zapotřebí výkonný a tuhý stroj, kterých je v kovovýrobnách málo a jsou tedy

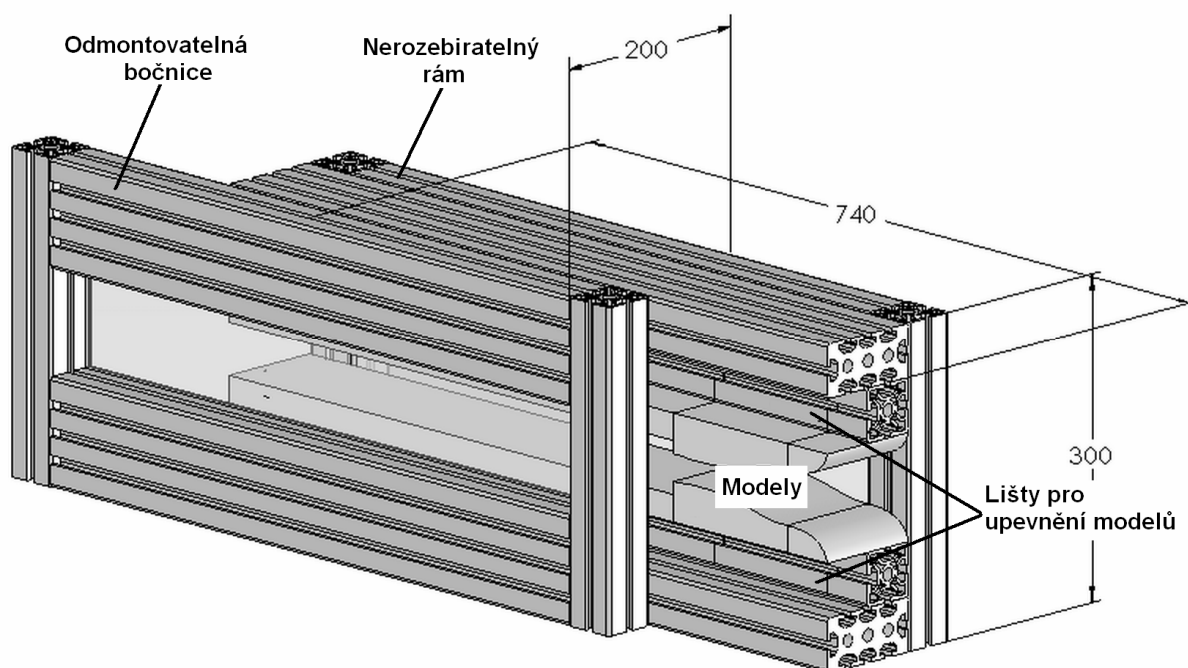
stále vytíženy (poptávka byla vrácena s odůvodněním, že mají přeplněnou výrobní kapacitu na 2 měsíce dopředu).

Přešlo se tedy na oblast nekonvenčního obrábění a jako nejlevnější byla zvolena metoda elektroerozivního řezání drátem (drátořez). Odpadly tak problémy s uchycením obrobků, protože při této metodě jsou na obráběný materiál přenášeny jen velmi malé síly. Dosahovaná přesnost u vybrané firmy (Jiří Chvojka WEDM s.r.o.) je 0,01mm a drsnost $Ra=0,8$. Drsnost byla dále snížena ručním leštěním.

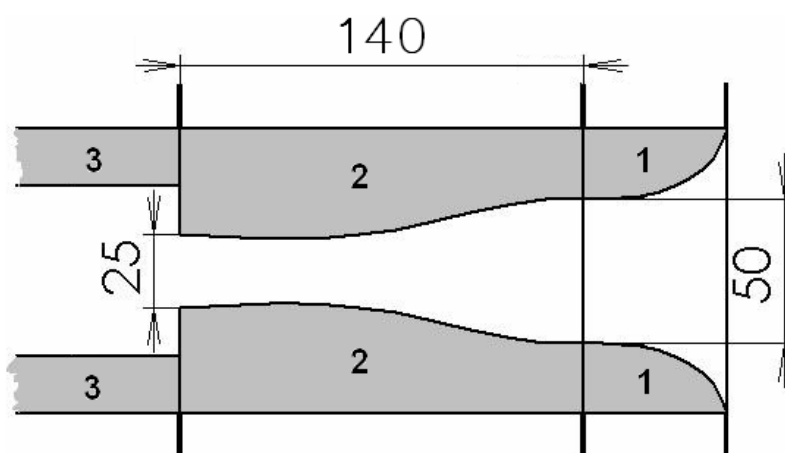
4.5 Finální návrh variabilního měřicího prostoru

Po zohlednění všech předchozích faktů byl navržen měřicí prostor o vnější délce 740mm, výšce 300mm a hloubce 200mm jak je zobrazeno na obr. 4.3. (kompletní výkresová dokumentace je v příloze)

Pro připojení měřicího prostoru ke stavebnicovému aerodynamickému tunelu Ústavu termomechaniky Akademie věd ČR v Novém Kníně, kde proběhlo konečné testování a měření, bylo zapotřebí konec měřicího prostoru opatřit redukční deskou. Tato deska z ocelového černěného plechu tloušťky 10mm slouží k uchycení celého prostoru k uklidňovací komoře tamějšího aerodynamického tunelu. Jelikož měřicí prostor nemá další opory je celá jeho váha držena ukotvením k desce. To je realizováno čtyřmi pozinkovanými šrouby M14 zašroubovanými do čela profilů, kde je právě k těmto účelům vytvořen otvor (bez závitů). Dále je deska přichycena čtyřmi pomocnými šrouby M8 (na každé straně 2), které slouží k dotěsnění okrajů okolo výstupního otvoru. Při výměně trysek pak slouží k dotažení bočnice zpět na své místo.



Obr. 4.3 Počítačový model měřicího prostoru.



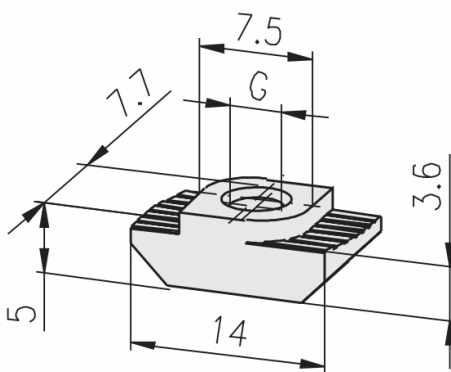
Obr. 4.4 Detail vstupní části tunelu - rozměr trysek, který je společný pro všechny trysky, 1-sací část, 2-tryska, 3-prostor modelu.

Na obr. 4.4 jsou zobrazeny rozměry, které jsou dodrženy u každé trysky, aby bylo možno je libovolně zaměňovat.

4.6 Montáž

Při výměně modelů se jako první demontují pomocné šrouby redukční desky, teprve potom je možno bočnici odšroubovat a odstranit. Při povolování šroubů držících lišty s modely se nejprve každý šroub povolí a poté ještě otočí o 180° aby se uvolnily matice. Nyní je možné sestavu lišty s modelem vysunout a provést výměnu.

Při upevňování modelů do měřicího prostoru se postupuje opačně. Nejprve je třeba model přišroubovat k upínacímu profilu, a až poté celou sestavu zamontovat do měřicího prostoru. Matice (obr. 4.5) se našroubují na šrouby těsně před konec závitu a srovnají rovnoběžně s hranou lišty. Po vsunutí modelů do tunelu se všechny šrouby lehce utáhnou a teprve poté dotáhnou. Pokud se některý šroub protáčí je potřeba ho přizvednout a pomalu dotahovat.

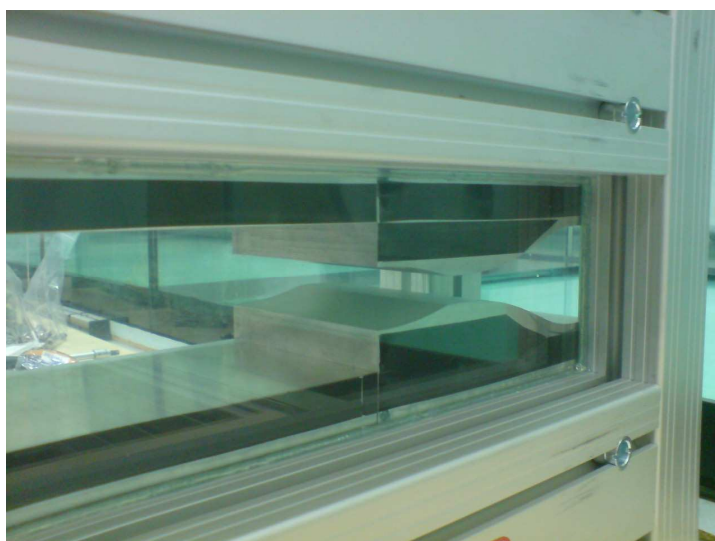


Obr. 4.5 Matice M6 systému profilů firmy Maytec.

Před samotným umístěním soustavy modelů je nutné nejprve vše opatřit těsněním. Jelikož je šířka tunelu dostatečně velká, malé netěsnosti se na zobrazeném proudu vůbec neprojeví vlivem integrálového charakteru šířkové metody (podkapitola 3.1). Proto postačí jako těsnicí materiál použít elektrikářskou izolační pásku, místy v několika vrstvách. Během experimentu se ukázalo, že i mezera mezi sklem a tryskou v některých místech až 0,3mm není problém. Otázkou zůstává zda je to tím, že díky šířce kanálu 100mm se tento tenký 3D efekt neprojeví nebo se sklo díky rozdílu tlaků při experimentu přitlačilo na pásku v celé ploše. Po kompletaci vypadá měřicí prostor jako na obr. 4.6 a 4.7.



Obr. 4.6 Hotový měřicí prostor pro nadzvukové proudění s tryskou $M_n=2,2$.



Obr. 4.7 Detail měřicího prostoru – vstupní část s tryskou.

Před samotným měřením byly mezi duralové ploché profily vsunuty dva 10mm rozpěrné plechy, které měly zabránit prohnutí duralových profilů vlivem rozdílu tlaků. Oba plechy byly dlouhé 400mm a ponechávaly tak dostatečně velký prostor pro optické pozorování (více viz příloha).

5. Návrh geometrie trysek

Návrh trysek byl proveden pomocí metody charakteristik (podkapitola 2.7)

5.1 Praktický postup při návrhu pomocí metody charakteristik

Nejprve je třeba určit základní hodnoty veličin ze zadaných parametrů pro trysku. Tím je myšlena základní geometrie trysky, jako je úhel rozevření, zda nadzvuková část bude začínat rádiusem nebo ostrou hranou, počet a síla jednotlivých expanzních vln, počet jejich odrazů. Vychází se při tom především z Machova čísla, které je cílem pro danou trysku.

- určí se λ (bezrozměrná rychlost) (2.28)
- vypočte se $\omega(\lambda)$ dle vztahu (2.40)
- označí-li se počet vln jedné intenzity v_i , příslušná síla $\Delta\omega_i$, počet variant vln m a počet odrazů k , pak výsledná ω_{celk} je určena vztahem

$$\omega_{celk} = 2k \sum_{i=1}^m v_i \Delta\omega_i \quad (5.1)$$

- např. pro Machovo číslo 2,2 vyšlo dle vztahu (2.40) $\omega=31,73^\circ$, což je vhodné zaokrouhlit na 32° a zpětným zpřesněním určit $M=2,21$. Jelikož metoda charakteristik zanedbává vliv vazkosti je zaokrouhlení výsledku směrem nahoru rozumnou volbou, jelikož skutečná rychlost bude o něco nižší vlivem mezní vrstvy.
- na základě této hodnoty lze volit několik možností počtů a k nim odpovídajících intenzit vln a jejich odrazů, např. 4 odrazy 4 vln o intenzitě 1° ; 2 odrazy 8 vln o intenzitě 1° ; 2 odrazy 4 vln o intenzitě $0,25^\circ$ a 7 vln o intenzitě 1° atd.
- z těchto hodnot je nutné určit polovinu úhlu rozevření

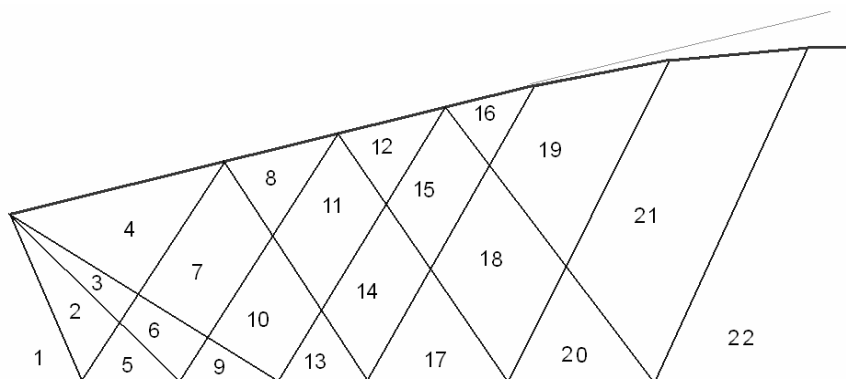
$$\varphi = \sum_{i=1}^n \Delta\omega_i \quad (5.2)$$

kde n je celkový počet vln.

5.1.1 Postup s minimální podporou počítače

Pro tento postup byly využity pouze základní matematické funkce programu Excel, CAD systém, papír a tužka.

Načrtne se tvar trysky a očíslovují se jednotlivá pole mezi vlnami dle obr. 5.1.



Obr. 5.1 Číslování polí v náčrtu trysky pro 3 charakteristiky- tlustá čára= obrys/osa symetrie; tenčí čára= charakteristika; nejtenčí čára= úhel rozevření trysky φ .

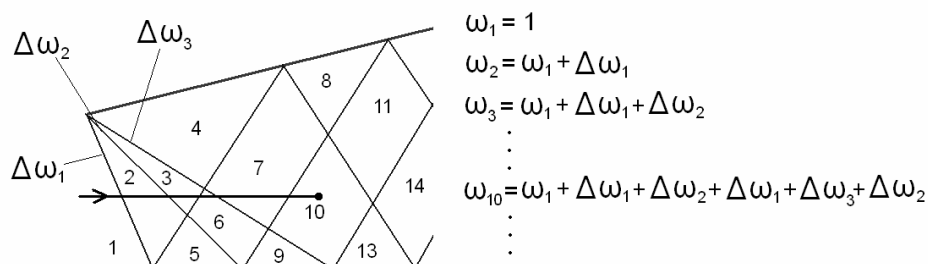
Sestaví se tabulka v tabulkovém kalkulátoru (např. Excel, Open Office) viz obr. 5.2.

a)	b)	c)	d)	e)	f)	g)
č. pole	M	λ	ω_{pl}	ω_{vyp}	α	směrnice
1						
2						
3						
4						

Obr. 5.2 Příklad tabulky- a) číslo pole, b) Machovo číslo, c) bezrozměrná rychlost, d) plánovaný úhel odklonu, e) vypočítaný úhel odklonu, f) Machův úhel, g) směrnice proudu.

Tabulka se postupně vyplňuje zleva doprava:

- a) Pro každé pole se určí hledaný úhel ω_{pl} :
- Při průchodu proudu vlnou intenzity $\Delta\omega_i$ se změní ω_{pl} právě o tuto hodnotu (příklad na obr. 5.3).



Obr. 5.3 Určení úhlu $\omega_{pl} - \omega_j$ hodnota odklonu proudu v j-tém poli, $\Delta\omega_i$ intenzita i-té vlny.

- Obvykle je více cest kudy se do daného pole dostat. Např. na obr. 5.3 lze volit cestu do pole 10 přes 1,2,5,6,9 a součet bude stále stejný jako při graficky naznačeném postupu.

b) Určení Machova čísla M v každém poli:

- 1) Odhadne se M (např. z předchozího pole) a vepíše se do sloupce (b) na obr. 5.2.

Do sloupce (c) na obr. 5.2 se zadá vzorec (2.28) pro výpočet λ .

Do sloupce (e) na obr. 5.2 zadáme vzorec (2.40) pro výpočet $\omega(\lambda)$.

Porovná se vypočítaný úhel ω_{vyp} s hledaným ω_{pl} .

Nyní se musí upravovat M tak dlouho dokud se ω_{pl} a ω_{vyp} nerovnají v rámci odpovídající tolerance. Při ručním postupu postačuje na 3 desetinná místa. Postup se opakuje dokud nejsou vyplněny všechny řádky. Pro urychlení lze využít faktu, že některá ω mohou být stejná.

Sloupec (f) na obr. 5.2 vyplníme Machovým úhlem podle vztahu (5.4).

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{1}{M}\right) \quad (5.4)$$

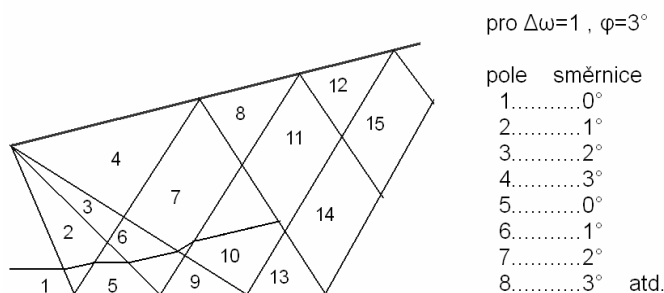
c) Do posledního sloupce (g) na obr. 5.2 se vepisuje hodnota směrnice ϑ .

- 1) Ta je definována jako úhel proudu v daném poli vzhledem k ose symetrie.

Pro kontrolu: je v rozsahu $0 \div \varphi$.

Průchod vlnou I. druhu mění směrnici o $+\Delta\omega_i$; průchod vlnou II. druhu mění směrnici o $-\Delta\omega_i$ vzhledem k předchozímu poli (viz obr. 5.4).

V poli přiléhajícím ke stěně má hodnotu úhlu stěny (popř. osy symetrie).

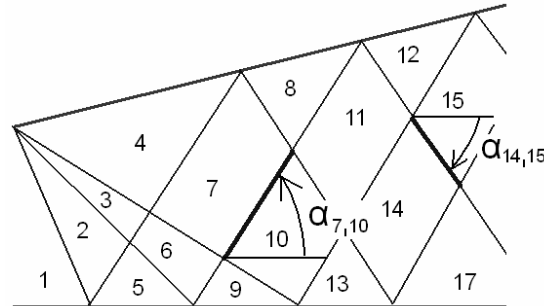


Obr. 5.4 Příklad hodnot směrnice a jejího vývoje pro $\Delta\omega_{1,2,3}=1^\circ$

d) Nyní zbývá spočítat úhly každé úsečky, jelikož po interakci vlny s jinou vlnou nebo stěnou se úhly mění. Použijí se vztahy (5.5a), (5.5b) (značení viz obr. 5.5).

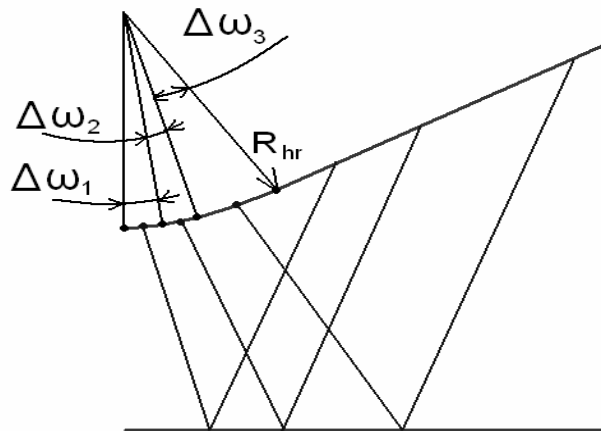
$$\alpha_{14,15} = \frac{-\alpha_{14} - \alpha_{15} + \vartheta_{14}^9 + \vartheta_{15}^9}{2} \text{ pro II. druh a} \quad (5.5a)$$

$$\alpha_{7,10} = \frac{\alpha_7 + \alpha_{10} + \vartheta_7^9 + \vartheta_{10}^9}{2} \text{ pro I. druh.} \quad (5.5b)$$



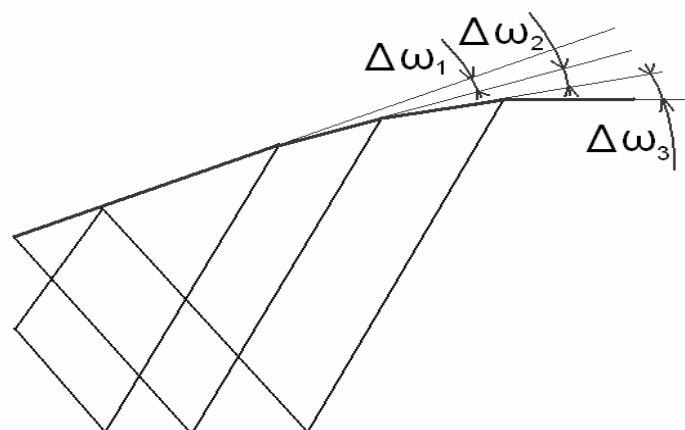
Obr. 5.5 Značení úhlů vln.

- 4) Nakonec se kreslí postupně všechny vlny v CAD systému (rýsování na papír by neúnosně zvýšilo chybu návrhu).
- a) Charakteristiky se vypouštějí buď z jednoho bodu (předchozí obrázky) nebo ze zaoblení s rádiusem R_{hr} (viz obr. 5.6). Pokud začínáme ze zaoblení, tak oblouk rozdělíme na n částí podle úhlů příslušných charakteristik. Vlny pak vypouštíme ze středu těchto úseků.



Obr. 5.6 Hrdlo trysky s nenulovým rádiusem.

- b) Na konci trysky je požadavek na vyrovnaný rychlostní profil, tj. aby se žádná vlna již neodrazila, ale zanikla. Proto se zde vypouští vlna opačného druhu – kompresní, což je provedeno zalomením stěny trysky o úhel $\Delta\omega_i$ takže výsledek bude vypadat obdobně jako na obr. 5.7.
- c) Pro numerickou simulaci a výrobu se pak nahradí koncová část spline funkcí za využití vypočítaných (zkonstruovaných) souřadnic.



Obr. 5.7 Zakončení trysky.

5.1.2 Využití programu

Součástí této diplomové práce je sestavení programu pro výpočet profilu stěny nadzvukové části trysky kombinovaného tvaru. K tomu je využita metoda charakteristik, která je při ručním zpracování velmi časově náročná a při tom značně mechanická, proto se dalo předpokládat, že takový program bude možno sestavit.

Proto pro rychlejší a přesnější výpočet tvaru trysky metodou charakteristik bylo sestaveno makro v programu Microsoft Office Excel. Cílem byla automatizace výpočtu umožňující rychlý výpočet tvaru trysky, který by byl co možná nejuniverzálnější, co do zadání úlohy. Základním předpokladem pro výpočet pomocí tohoto programu je kolmá zvuková čára v geometrickém hrdle trysky. Aby byl tento předpoklad splněn je potřeba správně tvarovat podzvukovou část trysky. Jako nejpoužitelnější se jeví tvar dvousinové křivky [15]

Princip programu

Ideou struktury navrženého makra je automatizovat číslování polí a pro každé pole určit ω_{pl} . To vše v závislosti na zadaném počtu vln s proměnnou intenzitou a různými počty odrazů.

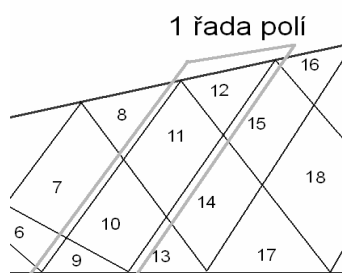
Základem celého makra jsou matice na obr. 5.8., kde n je počet vln a m je $n+1$ (zobrazeno pro 6 charakteristik).

		n					
1		0	0	0	0	0	0
2		1	0	0	0	0	0
3		1	1	0	0	0	0
m	4	1	1	1	0	0	0
5		1	1	1	1	0	0
6		1	1	1	1	1	0
7		1	1	1	1	1	1
		Matice A					

		n					
		2	0	0	0	0	0
		1	1	0	0	0	0
		1	0	1	0	0	0
m		1	0	0	1	0	0
		1	0	0	0	1	0
		1	0	0	0	0	1
		2	0	0	0	0	0
		Matice B					

Obr. 5.8 Počáteční matice počtů A a součtová matice B pro 6 charakteristik.

V řádcích matice počtů A je zobrazeno kolikrát jde proud skrze příslušnou charakteristiku cestou do příslušného pole (číslo řádku = číslo pole), sloupce odpovídají příslušným vlnám. Každá tato matice odpovídá jedné řadě polí (viz obr. 5.9).



Obr. 5.9 Platnost jedné matice počtů – vyznačení 1 „řady“ polí

Součtová matice B odpovídá navýšení počtu průchodů proudu jednotlivými vlnami. Z toho vyplývá, že další matici počtů získáme $A_{i+1} = A_i + B_i$. Rozdíl mezi počtem charakteristik a počtem polí v řadě způsobuje, že se součtová matice s každou další řadou polí mění. Poslední sloupec se přesune místo 1. sloupce a všechny ostatní (včetně prvního) se posunou o jeden sloupec vpravo.

Program tedy vygeneruje matice pro všechny tyto řady (posledních n matic se postupně zkracuje), díky tomu je dále možné dosáhnout výpočtu ω_{pl} pro každé pole.

Další důležitou součástí programu je list s Machovým číslem v závislosti na úhlu odklonu ω , který je odstupňován po $0,01^\circ$ od 0 do $62,5^\circ$, což jsou zároveň základní omezení programu (nejnižší volitelná intenzita vlny a maximální Machovo číslo 3,77). Rozsah lze samozřejmě kdykoliv zvětšit, ale zjemnění kroku by znamenalo rozsáhlejší zásah do programu.

Poslední částí programu je výpočet geometrie: úhly jednotlivých úseček a souřadnice jejich průsečíků. Zde jsou použity základní vzorce z analytické geometrie pro počty s přímkami.

Praktické použití programu

Na obr. 5.10 je vidět první list sešitu, který slouží jako uživatelské rozhraní. Na této první stránce také naleznete komentář k užívání programu a kde hledat výsledky. Některé výsledky (např. omega) jsou zobrazovány ihned po vložení údajů, jiné (např. Machovo číslo) až po proběhnutí výpočtů.

V programu je zabudována kontrola, zda radius není příliš velký, což by způsobilo nereálné výsledky (pokud je radius tak velký, že první odražená vlna dopadne před bod vypuštění té poslední, program vás na to upozorní).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	počet druhů vln	1							pro graf max 33 charakteristik				
2	počet odrazů	2							celkem charakteristik: 6				
3	počet vln	6											
4	příslušná síla	1											
5	Yhr	7,944											
6	phi	6											
7	výška na výstupu	25											
8	machovo číslo	A/Akr											
9	1,91465454	1,574											
10	Radius	15											
11	omega	24											
12													
13		6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14													
15	návod:	Žlutá pole jsou nutná k výpočtu, azurová pole jsou pro další charakteristiky (snížení počtu charakteristik provedte vymazáním přebytečných hodnot)(nepoužíváte-li radius zadejte 0). Hodnoty charakteristik řadte tak jak jdou po proudu (z leva do prava).											
16		Pro kompletní výpočet klikněte na "Spust' výpočet", pokud jste změnili pouze sílu charakteristik nebo sílu a rozměr klikněte na "Hledání omega" a pak na "Výpočet souřadnic". Po změně pouze rozměru stačí kliknout pouze na "Výpočet souřadnic". Aktuální hodnotu machova čísla získáte až po kliknutí na "Hledání omega", popř. po proběhnutí druhé části výpočtu.											
17		Yhr [mm] je polovina výšky kritického průřezu (vypočítávaná z machova čísla)											
18		phi [°] je poloviční úhel rozevření trysky											
19		Pokud jste doplňovali tabulku hodnot pro omega tak klikněte na "Kontrola tabulky" aby bylo zaručeno správné vyřešení úlohy											
20	výsledky:	Na kartě "souřadnice" v prvních dvou sloupcích jsou souřadnice bodů popisujících výslednou křivku trysky (x složka v posledním řádku je volitelná). V dalších sloupcích jsou rozepsány jednotlivé charakteristiky.											
21		Pole cihlové barvy jsou vyplněny základními údaji (automaticky)											
22													
23													
24													

Spust' výpočet

Výpočet matic

Hledání omega

Výpočet souřadnic

Kontrola tabulky

zadání / matice / omega / výsledek / souřadnice / tryska / obrys / body

Obr. 5.10 První list sešitu.

Celé makro je rozděleno do třech částí nutných pro kompletní výpočet trysky, navíc je přiložena kontrola tabulky hodnot ω . Kliknutím na *Spust' výpočet* se spustí všechny 3 části, ale po každé z nich se musí odsouhlasit pokračování (kvůli kontrolám chyb zadání). Tři tlačítka na pravé straně spouští jednotlivé části

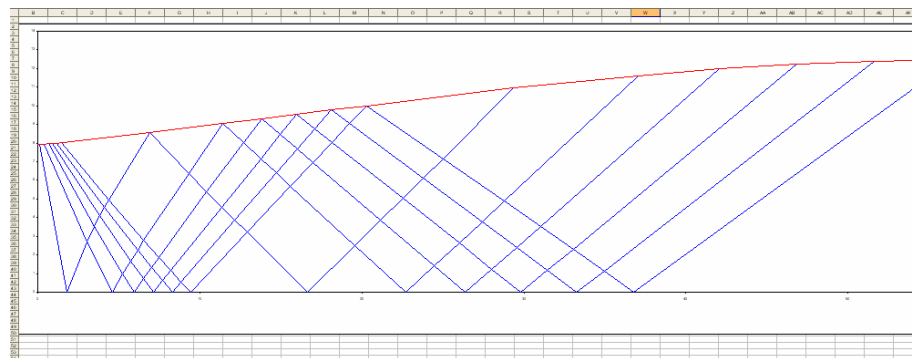
odděleně. V případě, že uživatel rozšiřoval tabulku hodnot ω (3. list), je vhodné ji překontrolovat spuštěním odděleného makra *Kontrola tabulky hodnot ω* .

Nejdůležitějším listem pro uživatele je list *souřadnice* kde jsou vypsány souřadnice jednotlivých bodů stěny trysky i charakteristik. První dva sloupce na tomto listu jsou souřadnice jednotlivých bodů obrysové křivky – na obr. 5.11 se jedná o červený rámeček. Modré obrysy zvýrazňují jednotlivé charakteristiky, vždy po dvou sloupcích v pořadí v jakém byly vypuštěny z počátečního bodu.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	x	y		x	y	x	y	x	y	x	y	
2	0	7,943517719		0,130898032	7,9440889	0,392654225	7,948657844	0,654291	7,957794395	0,915728093	7,971495743	1,17E
3	0,130898032	7,944088873		1,777905443	0	3,027050371	2,71403292	3,467089	3,527480928	3,810379827	4,103186859	4,104
4	0,392654225	7,948657844		3,027050371	2,7140329	4,620089548	0	5,245241	0,96976725	5,736645707	1,684005521	6,15E
5	0,65429081	7,957794395		3,46708913	3,5274809	5,245240752	0,96976725	5,963577	0	6,531148936	0,731141978	7,02E
6	0,915728093	7,971495743		3,810379827	4,1031859	5,736645707	1,684005521	6,531149	0,731141978	7,162574029	0	7,70E
7	1,176886436	7,989757713		4,104884431	4,5649591	6,159057365	2,269229741	7,020485	1,339440657	7,709077714	0,615913338	8,30E
8	1,437686288	8,012574743		4,368589557	4,9585659	6,537802061	2,775243426	7,460261	1,871363194	8,201750842	1,159709428	8,84E
9	1,567926949	8,025689288		6,890459651	6,58511	9,308730288	6,37559703	10,42216	5,379246149	11,34089437	4,570085351	12,1E
10	6,890459651	8,585110018		9,308730288	6,375597	11,42029946	9,061215367	12,6884	8,020646157	13,75167345	7,158534711	14,7E
11	11,42029946	9,061215367		10,42215785	5,3792461	12,68839872	8,020646157	13,80888	9,312370021	14,96380756	8,449204231	16,0E
12	13,80987638	9,312370021		11,34089437	4,5700854	13,75167345	7,158534711	14,96381	8,449204231	15,99577865	9,542117608	17,11
13	15,99577865	9,542117608		12,15654284	3,8601675	14,70581189	6,391461927	16,00511	7,674658338	17,11708688	8,769714038	18,12
14	18,12985595	9,76641816		12,90630599	3,2130511	15,59000242	5,684539631	16,97441	6,955819629	18,16496629	0,048382446	19,2E
15	20,27720675	9,992113834		16,64937351	0	19,57726451	2,506024935	21,1563	3,856648161	22,53409665	5,036690045	23,8E
16	29,36116995	10,94687684		19,57726451	2,5060249	22,72304184	0	24,47261	1,395616954	26,01476739	2,629614686	27,44
17	37,07886647	11,62208779		21,15629989	3,8566482	24,47261141	1,395616954	26,3473	0	28,009494	1,243370984	29,5E
18	42,06901473	11,97103295		22,53409665	5,03669	26,01476739	2,629614686	28,00949	1,243370984	29,7872373	0	31,4E
19	46,84810943	12,22149469		23,80611358	6,1294843	27,44855854	3,782310701	29,56162	2,411680045	31,45370767	1,174589831	33,2E
20	51,62571433	12,38833233		25,01172594	7,1700503	28,81497293	4,887600181	31,04612	3,53756151	33,05276226	2,311782388	34,9E
21	56,49371795	12,47330365		29,36116995	10,946877	37,07886647	11,62208779	42,06901	11,97103295	46,84810943	12,22149469	51,62
22	61	12,5										

Obr. 5.11 Číselné výsledky v listu *souřadnice*.

Na obr. 5.12 je zobrazen grafický náhled trysky vytvořený jako graf v Excelu (není dodržen poměr stran x/y)

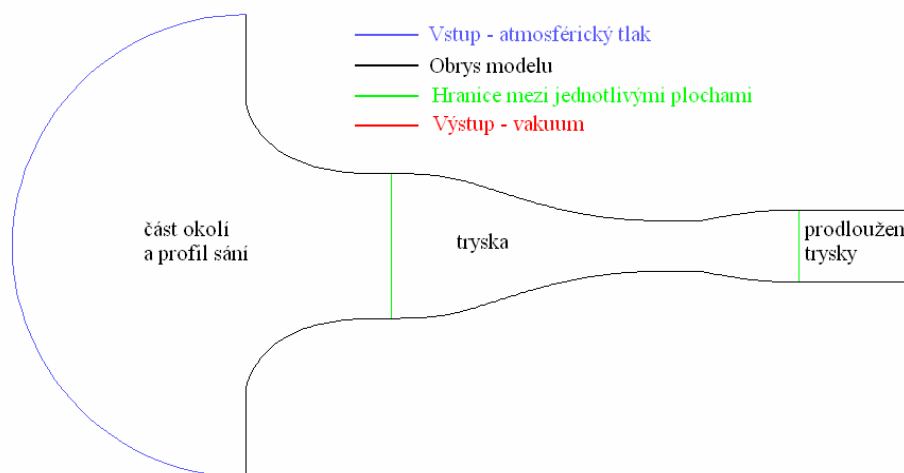


Obr. 5.12 Grafický výstup – červená linka je obrys a modré jsou charakteristiky.

5.2 Jednotlivé trysky

První tři trysky vyráběné pro tento měřicí prostor, byly navrženy na jmenovité návrhové Machovo číslo 1,4, 1,8 a 2,2. Každá tryska byla navržena pomocí programu Metoda charakteristik, který je popsán v odstavci 5.1.2. Pro srovnání byly v programu Fluent tyto geometrie simulovány pro proudění vazké a nevazké tekutiny. Výpočtová doména se skládala ze vstupní části tunelu (část okolí + sací

profil tvořený $\frac{1}{4}$ lemniskáty + podzvuková tryska tvořená dvousinovou křivkou) a profilu samotné trysky (viz obr. 5.13). Výpočtová síť má přes 13000 buněk čtyřúhelníkového typu z nichž přibližně 8000 je v oblasti trysky.

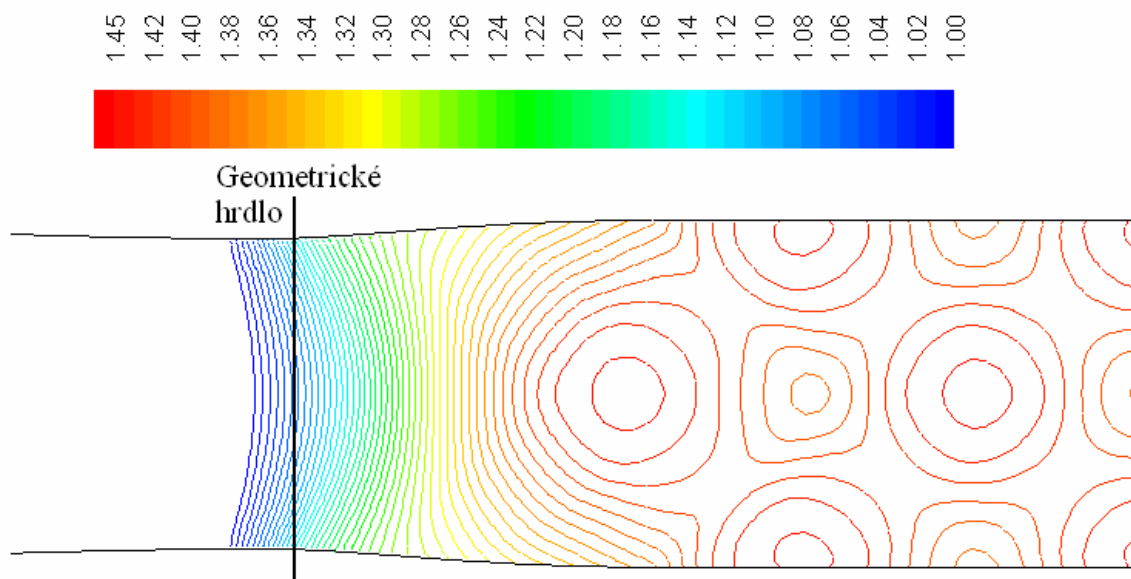


Obr. 5.13 Výpočtová doména pro porovnání metody charakteristik se simulací v programu Fluent.

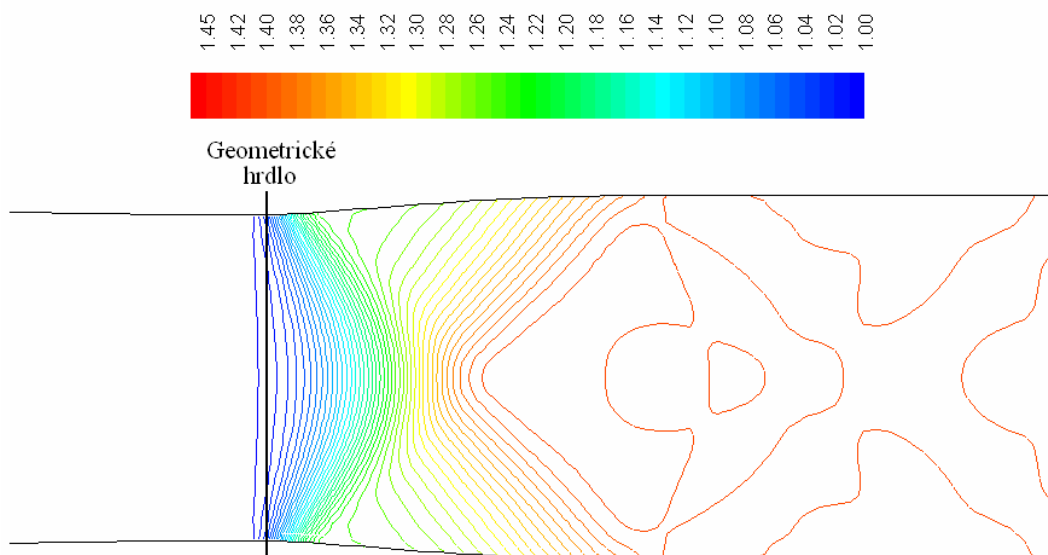
Křivku tvořící obrys trysky bylo třeba rozdělit na 3 části, jinak docházelo k velkým chybám interpolace při generování spline funkce jak je vidět na obr. 5.14. To vedlo k rozdílným výsledkům numerické simulace. Nejvýrazněji se chyba projevila u trysky $M_n=1,4$ (viz obr. 5.15 porovnaný s obr. 5.16).



Obr. 5.14 Chyba interpolace příliš mnoha bodů, detail geometrického hrdla – červená=rozděleno na 3 části; černá=všechny body najednou.



Obr. 5.15 Chyba simulace vlivem nepřesnosti interpolace křivky.



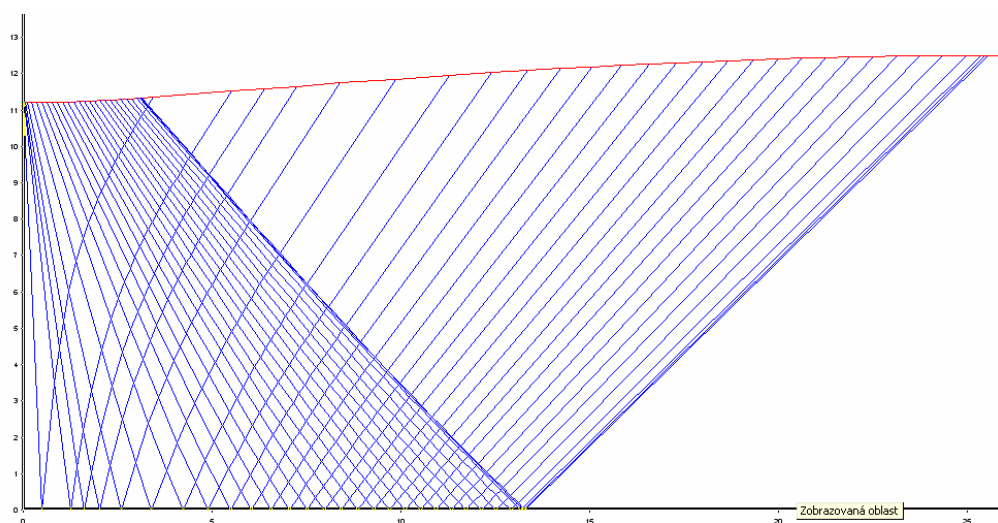
Obr. 5.16 Přesnější interpolace stěny trysky.

5.2.1 Tryska $Mn=1,4$

Pro návrhové Machovo číslo 1,4 vychází odklon proudu $\omega=8,987$. Nejbližší vyšší celé číslo je 9, které proto bylo vybráno jako určující hodnota ω_{celk} . Na obr. 5.17 jsou uvedeny všechny důležité parametry potřebné pro určení geometrie trysky. Návrhový tlakový poměr byl určen pomocí dynamické funkce (2.24) pro izoentropické proudění $p/p_0=0,314$ [2].

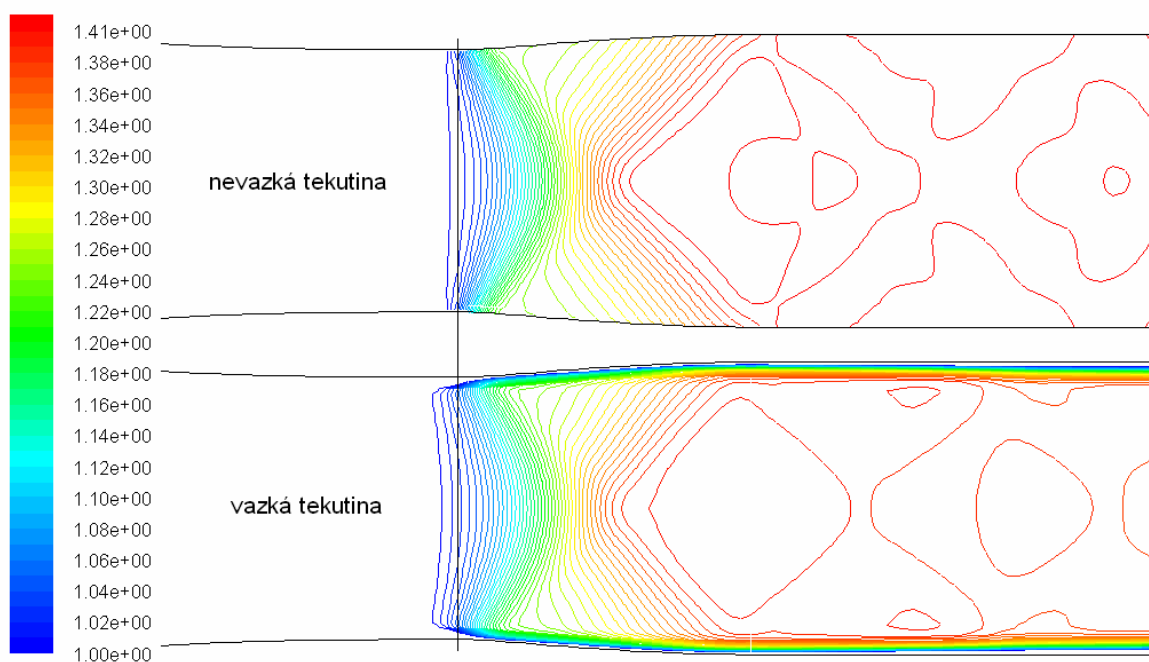
počet druhů vln	7							pro graf max 33 charakteristik			
počet odrazů	1							celkem charakteristik: 29			
počet vln	1	2	1	1	21	1	2				
příslušná síla	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,06	0,02				
Yhr	11,21										
phi	4,5	Spust' výpočet						Výpočet matic			
výška na výstupu	25										
machovo číslo	A/Akr	Kontrola tabulky						Hledání omega			
	1,400450548										
Radius	40							Výpočet souřadnic			
omega	9										

Obr. 5.17 Vyplněný zadávací formulář pro trysku $M_n=1,4$.



Obr. 5.18 Tryska $M_n=1,4$ vykreslená v programu Excel pomocí programu Metoda charakteristik.

Na obr. 5.20 je vidět rozdíl mezi nevazkou tekutinou, která je uvažována pro metodu charakteristik, a vazkou tekutinou. Při proudění nevazké tekutiny se vytvořila zvuková čára ($M=1$) velmi blízko geometrického hrdla a je téměř kolmá. U vazké tekutiny došlo vlivem tloušťky mezní vrstvy k vysunutí zvukové čáry z hrdla směrem doleva (proti proudu). Rychlostní profil za koncem trysky je relativně vyrovnaný, maximální nepřesnost je $\Delta M=0,02$ pro obě tekutiny. Vlivem mezní vrstvy u vazké tekutiny došlo k mírnému zpomalení proudu, $M_{\max, \text{vaz}}=1,398$ a $M_{\max, \text{nevaz}}=1,406$.



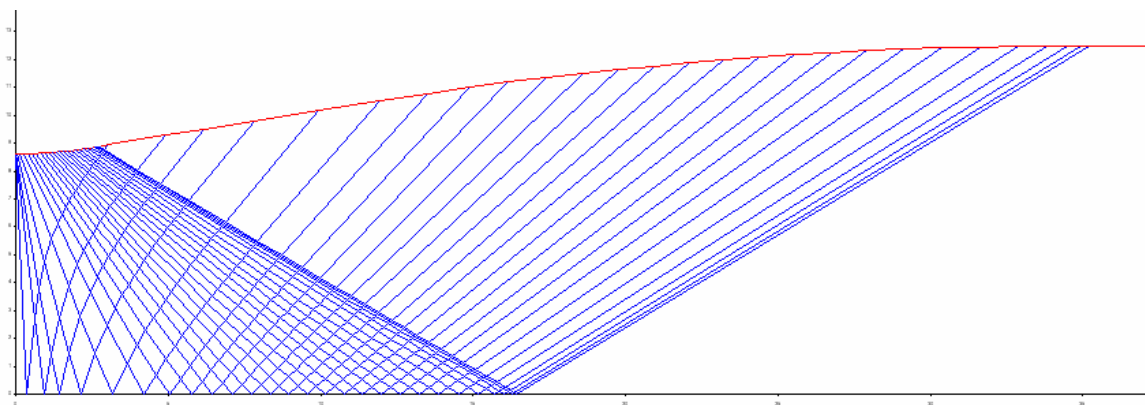
Obr. 5.19 Simulace v programu Fluent –kontury Machova čísla v rozsahu $M=1$ až $M=1,41$. Jedna čára odpovídá změně M o 0,01.

5.2.2 Tryska $M_n=1,8$

Pro návrhové Machovo číslo 1,8 vychází odklon proudu $\omega=20,725$. Nejbližší vyšší celé číslo je 21, které proto bylo vybráno jako určující hodnota ω_{celk} . Na obr. 5.20 jsou uvedeny všechny důležité parametry potřebné pro geometrii trysky. Návrhový tlakový poměr byl určen z tabulek dynamických funkcí pro izoentropické proudění $p/p_0=0,1715$ [2].

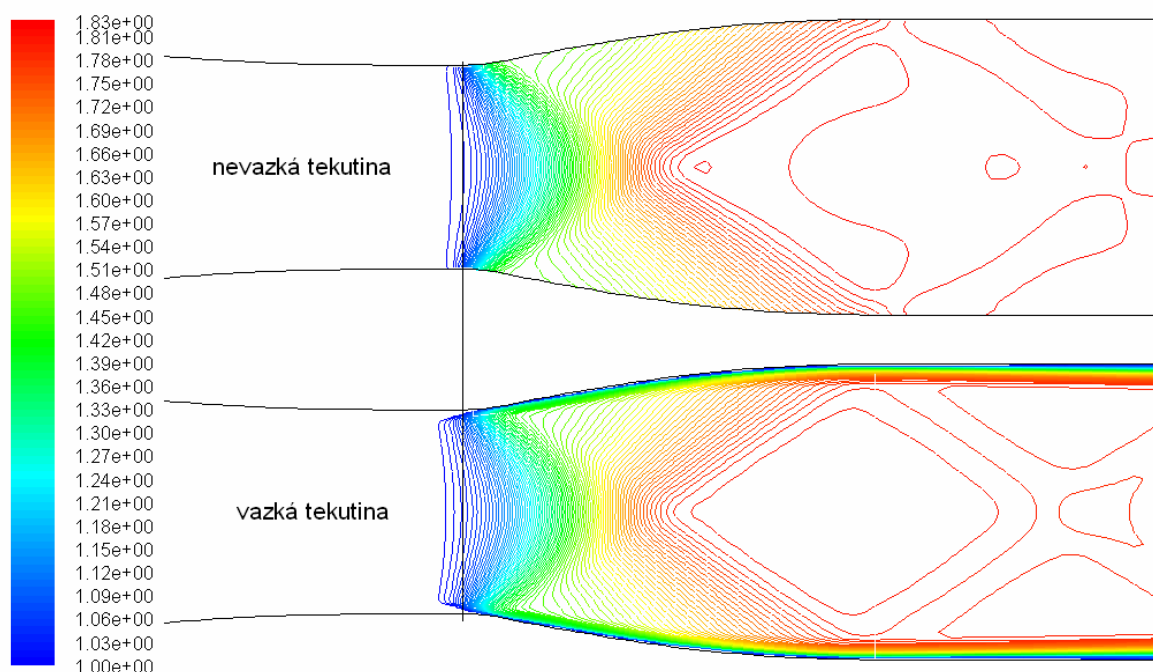
počet druhů vln	7							pro graf max 33 charakteristik			
počet odrazů	1							celkem charakteristik: 27			
počet vln	1	1	1	1	19	2	2				
příslušná síla	0,01	0,02	0,07	0,2	0,5	0,25	0,1				
Yhr	8,624	<div>Spust' výpočet</div>						<div>Výpočet matic</div>			
phi	10,5										
výška na výstupu	25	<div>Kontrola tabulky</div>						<div>Hledání omega</div>			
machovo číslo	A/Akr										
	1,809519377	1,449	<div>Výpočet souřadnic</div>								
Radius	15										
omega	21										

Obr. 5.20 Vyplněný zadávací formulář pro trysku $M_n=1,8$.



Obr. 5.21 Tryska $M_n=1,8$ vykreslená v programu Excel pomocí programu Metoda charakteristik.

Na obr. 5.22 je porovnávána simulace vazké a nevazké tekutiny. Při proudění nevazké tekutiny se vytvořila zvuková čára ($M=1$) blízko geometrického hrdla a je téměř kolmá. U vazké tekutiny došlo vlivem tloušťky mezní vrstvy k vysunutí zvukové čáry z hrdla směrem doleva (proti proudu). Rychlostní profil za koncem trysky je relativně vyrovnaný, především u nevazké tekutiny kde maximální nepřesnost je $\Delta M=0,02$. Rychlostní profil vazké tekutiny je o něco horší, chyba zde dosahuje velikosti $\Delta M=0,03$. Vlivem mezní vrstvy u vazké tekutiny došlo k mírnému zpomalení proudu, $M_{\max,vis}=1,804$ a $M_{\max,nevis}=1,821$.



Obr. 5.22 Simulace v programu Fluent –kontury Machova čísla v rozsahu $M=1$ až $M=1,83$. Jedna čára odpovídá změně M o 0,01.

5.2.3 Tryska $M_n=2,2$

Pro návrhové Machovo číslo 2,2 vychází odklon proudu $\omega=31,732$. Nejbližší vyšší celé číslo je 32, které proto bylo vybráno jako určující hodnota ω_{celk} . Na obr. 5.23 jsou uvedeny všechny důležité parametry potřebné pro geometrii trysky. Návrhový tlakový poměr byl určen z tabulek dynamických funkcí pro izoentropické proudění $p/p_0=0,092$ [2].

počet druhů vln	7							pro graf max 33 charakteristik	
počet odrazů	1							celkem charakteristik:	27
počet vln	1	1	1	1	19	2	2		
příslušná síla	0,01	0,02	0,1	0,2	0,79	0,23	0,1		
Yhr	6,178								
phi	16								
výška na výstupu	25								
machovo číslo	A/Akr								
	2,210333075	2,023							
Radius	8								
omega	32								

Spust' výpočet

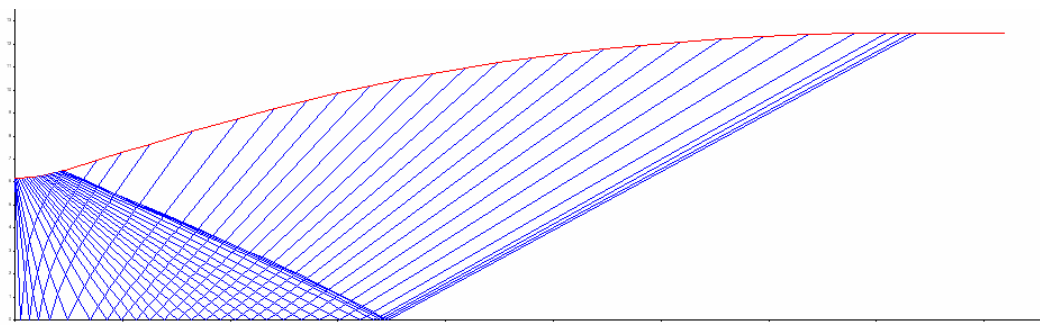
Výpočet matic

Kontrola tabulky

Hledání omega

Výpočet souřadnic

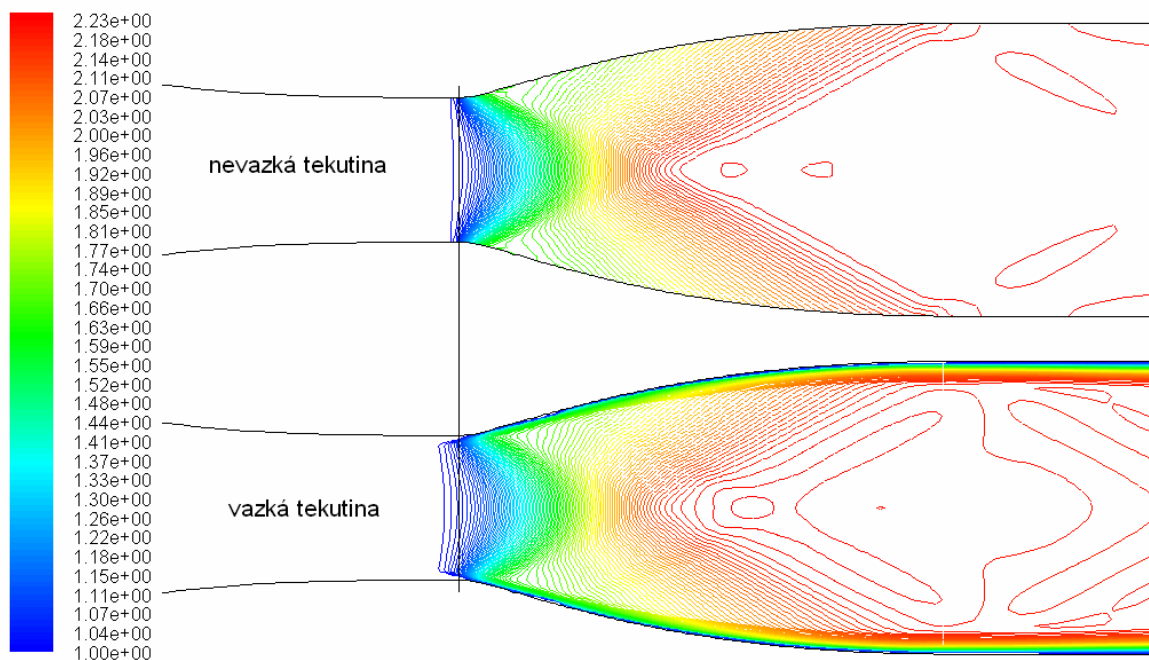
Obr. 5.23 Vyplněný zadávací formulář pro trysku $M_n=2,2$.



Obr. 5.24 Tryska $M_n=2,2$ vykreslená v programu Excel pomocí programu Metoda charakteristik.

Na obr. 5.25 je porovnávána simulace vazké a nevazké tekutiny. Při proudění nevazké tekutiny se vytvořila zvuková čára ($M=1$) blízko geometrického hrdla a je téměř kolmá. U vazké tekutiny došlo vlivem tloušťky mezní vrstvy k vysunutí zvukové čáry z hrdla směrem doleva (proti proudu). Rychlostní profil za koncem trysky je relativně vyrovnaný, především u nevazké tekutiny kde maximální nepřesnost je $\Delta M=0,0123$. Rychlostní profil vazké tekutiny je o něco horší, chyba zde dosahuje velikosti $\Delta M=0,0369$. U předchozích případů došlo vlivem mezní

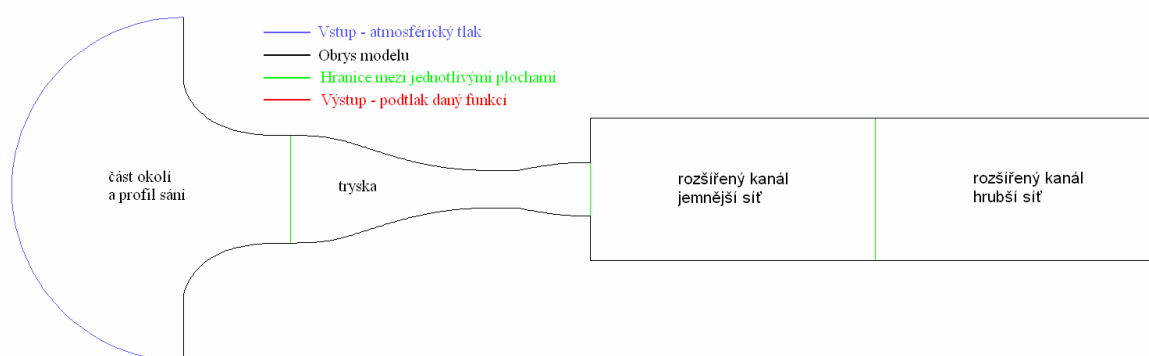
vrstvy ke zpomalení kvůli třecím silám (vazká tekutina), zde převládá vliv zúžení kritického průřezu hrdla o mezní vrstvu a tím se mírně zvýšilo Machovo číslo, $M_{\max,vis}=2,225$ a $M_{\max,nevis}=2,219$.



Obr. 5.25 Simulace v programu Fluent –kontury Machova čísla v rozsahu $M=1$ až $M=2,22$. Jedna čára odpovídá změně M o 0,0123.

6. Simulace celého měřicího prostoru

Proudění bylo simulováno v programu Fluent 5 jako nestacionární, ale s velkým časovým krokem (1s) aby se potlačila nestacionarita děje a přitom bylo možné automaticky měnit tlakový poměr. Protože experimentální zobrazení pracuje pouze jako 2D metoda, postačilo i simulaci vytvořit jako 2D úlohu. Pro simulaci celého prostoru byl použit turbulentní model $k-\omega$ SST, který kombinuje dobré vlastnosti modelu $k-\omega$ u stěny (mezní vrstva) a výhodnější vlastnosti modelu $k-\epsilon$ pro volný proud. Jelikož se jedná o stlačitelné proudění, je třeba zvolit model *density based* (založeno na hustotě), který by se měl použít při $M > 0,3$.



Obr. 6.1 Výpočtová doména pro celý měřicí prostor.

Na vstupu byla nastavena podmínka pressure-inlet s tlakem 100kPa a teplotou 295K, která byla v místnosti v době měření. Na výstupu byla nastavena obdobná podmínka, pressure-outlet, ale její hodnota byla řízena funkcí

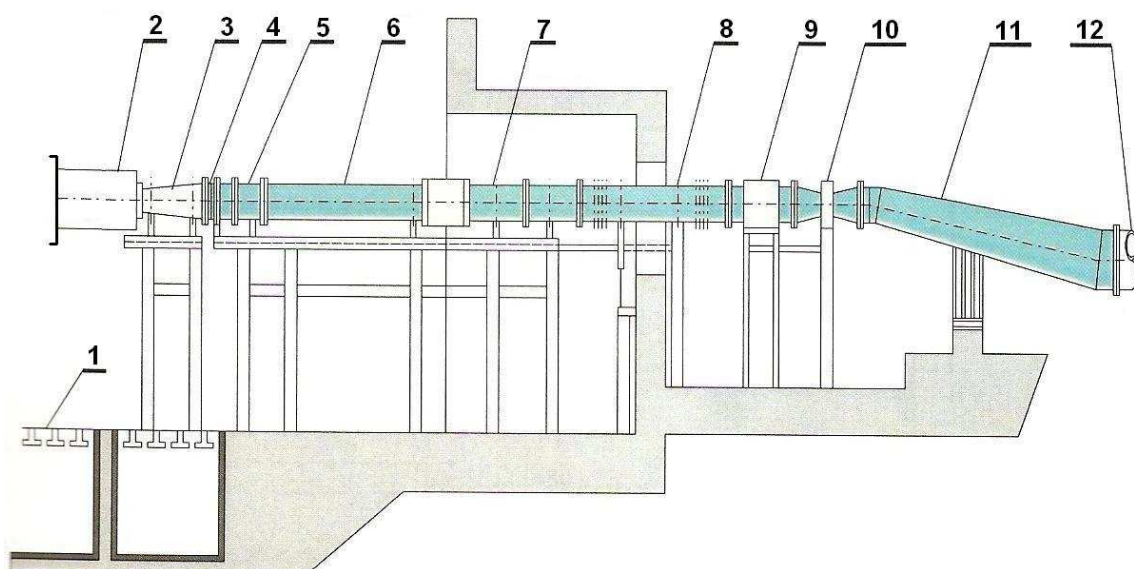
$$p = 90000 - 1000 \cdot t, \quad (6.1)$$

kde t je čas proudění. Tato funkce znamená, že každý časový krok se tlakový poměr zmenší o 0,01. Tím se automaticky nasimuluje celý rozsah tlaků. V případě potřeby je pak možno vybrané režimy počítat s menším krokem (tlaku) a tím získat přesnější data.

7. Experiment

Experimentální měření probíhalo v laboratoři vysokých rychlostí ústavu termomechaniky AVČR, pod vedením Ing. Martina Luxy, Ph.D. a doc. Ing. Václava Dvořáka, Ph.D.

Nejprve bylo třeba sestavit a vyladit optickou trať šlírového přístroje, což provedl Ing. Martin Luxa, Ph.D. Po montáži měřicího prostoru na uklidňovací komoru (obr. 7.2) se provedla tlaková zkouška, při níž se ověřovalo zda se tunel příliš nedeformuje či nedochází k deformacím skla jež by ovlivnili měření. Při samotném měření nebylo možné pořizovat dokumentační fotografie, jelikož muselo být zhasnuto aby se zabránilo světelným emisím na pořizovaných snímcích proudění.



Obr. 7.1 Schéma aerodynamického tunelu v Novém Kníně. 1-základový blok s roštem, 2-uklidňovací komora, 3-přechodový díl, 4-pryžový kompenzátor, 5-axiální kompenzátor, 6-spojovací potrubí, 7-regulační orgán, 8-dvouvlivnovcový kompenzátor, 9-pneumatický rychlouzávěr, 10-šoupě s elektromotorem, 11-přechodový kus, 12-potrubí k vakuové nádrži [4].



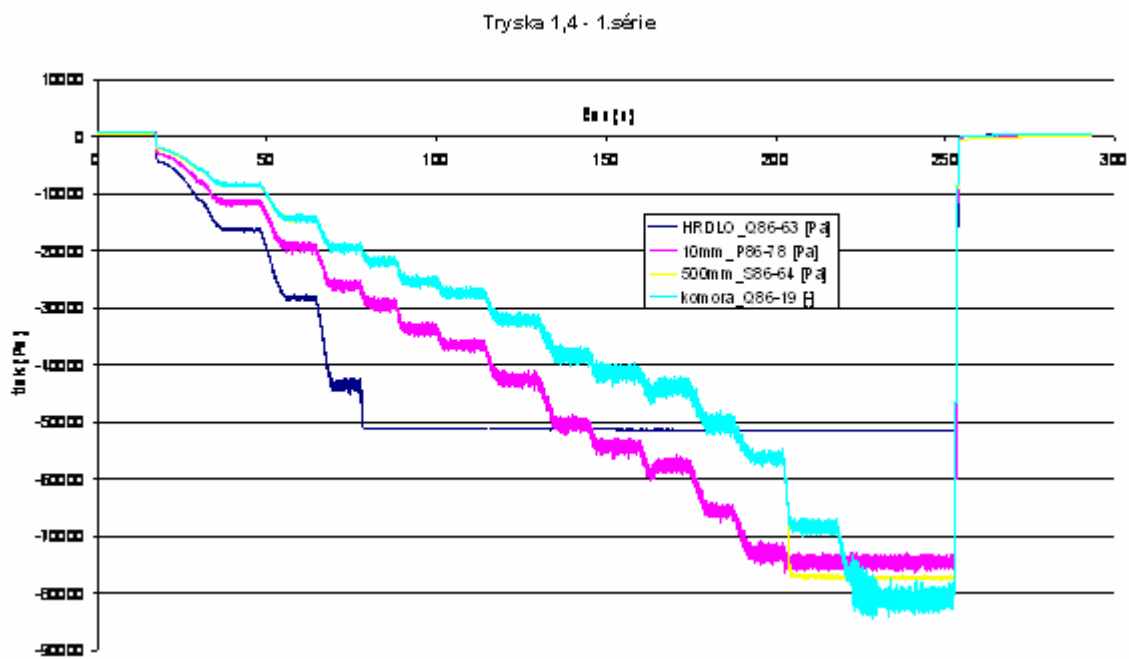
Obr. 7.2 Pohled na aerodynamický tunel z laboratoře (v popředí uklidňovací komora).

Každá série měření probíhala podle následujícího sledu:

- začínalo se s maximálním / minimálním otevřením regulačního orgánu (obr. 7.1 (7)) (minimální poměr tlaků – nejvyšší rychlost / naopak))
- postupně se regulace zavírala (snižování rychlosti) / otevírala
- na stínítku fotoaparátu se sledoval průběh proudění
- pokud se objevil zajímavý režim, nechalo se proudění ustálit
- pořídili se 2 snímky daného režimu
- poté se opět začal zvyšovat / snižovat poměr tlaků.

Celý postup se opakoval dokud změna nastavení regulačního orgánu vedla ke změně zobrazeného proudění. Takovýmto způsobem byla proměřena každá tryska minimálně dvakrát při různém nastavení clonky a natočení filtru. Jednou při nízkém osvětlení pro zobrazení výrazných dějů, především v trysce a podruhé při vyšším množství světla, které zobrazilo i méně výrazné děje, což bylo vhodné pro část za tryskou.

Během měření byl spuštěn záznam dat z tlakoměrů s frekvencí 100Hz. Při vyhodnocování byl naměřený soubor rozdělen tak, aby pro statistické vyhodnocení byl brán v potaz jen ustálený režim proudění a tím i ustálený tlak (krom fluktuací). Na grafu 7.1 je průběh tlaku během jednoho měření, každý „schod“ odpovídá jednomu vyfocenému režimu.



Graf 7.1 Průběh tlaků při 1. sérii měření na trysce $M_n=1,4$.

8. Srovnání experimentu a numerické simulace

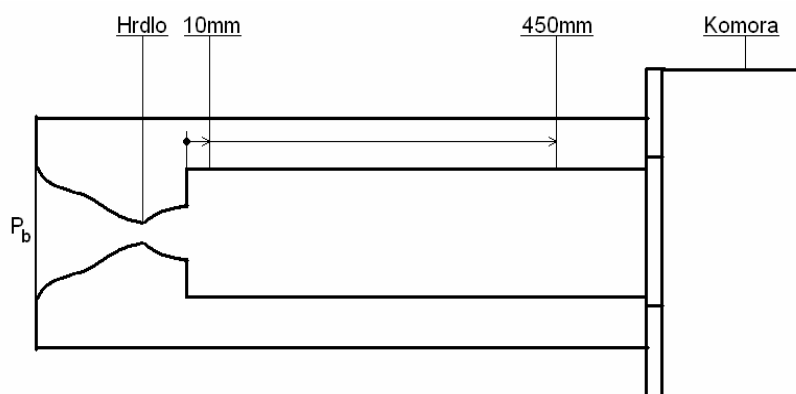
Na následujících stranách jsou pod sebou zobrazeny výsledky numerické simulace a experimentu doplněné o schéma proudu. Aby bylo ze snímků jasné co která barva znamená, jsou opatřeny znázorněním nastavení barevného filtru (viz kapitola 3.1.2). Na každé stránce je jeden režim trysek a to v pořadí:

- podzvukový režim (pokud byl vyfocen)
- mezní režim
- rázová vlna v trysce
- rázová vlna ve výstupním průřezu
- přeexpandovaný proud
- návrhový režim
- podexpandovaný proud

Pro porovnání byly spárovány odpovídající si režimy proudění a u každého jsou uvedeny hodnoty poměru tlaku p/p_0 , který byl pro danou situaci změřen nebo spočítán. Významy indexů jsou zřejmé z obr. 8.1 na němž je zobrazeno schéma rozmístění tlakových snímačů.

U schématu je uveden rozsah tlakových poměrů pro skupiny režimů a konkrétní hodnoty pro hraniční režimy, které byly určeny pomocí dynamických funkcí. Schéma proudu dodržuje tyto barvy pro jednotlivé jevy:

- černá – obrys trysky
- červená tlustá – rázová vlna
- červená tenká – kompresní vlna
- modrá tenká – expanzní vlna
- hnědá – hranice proudu



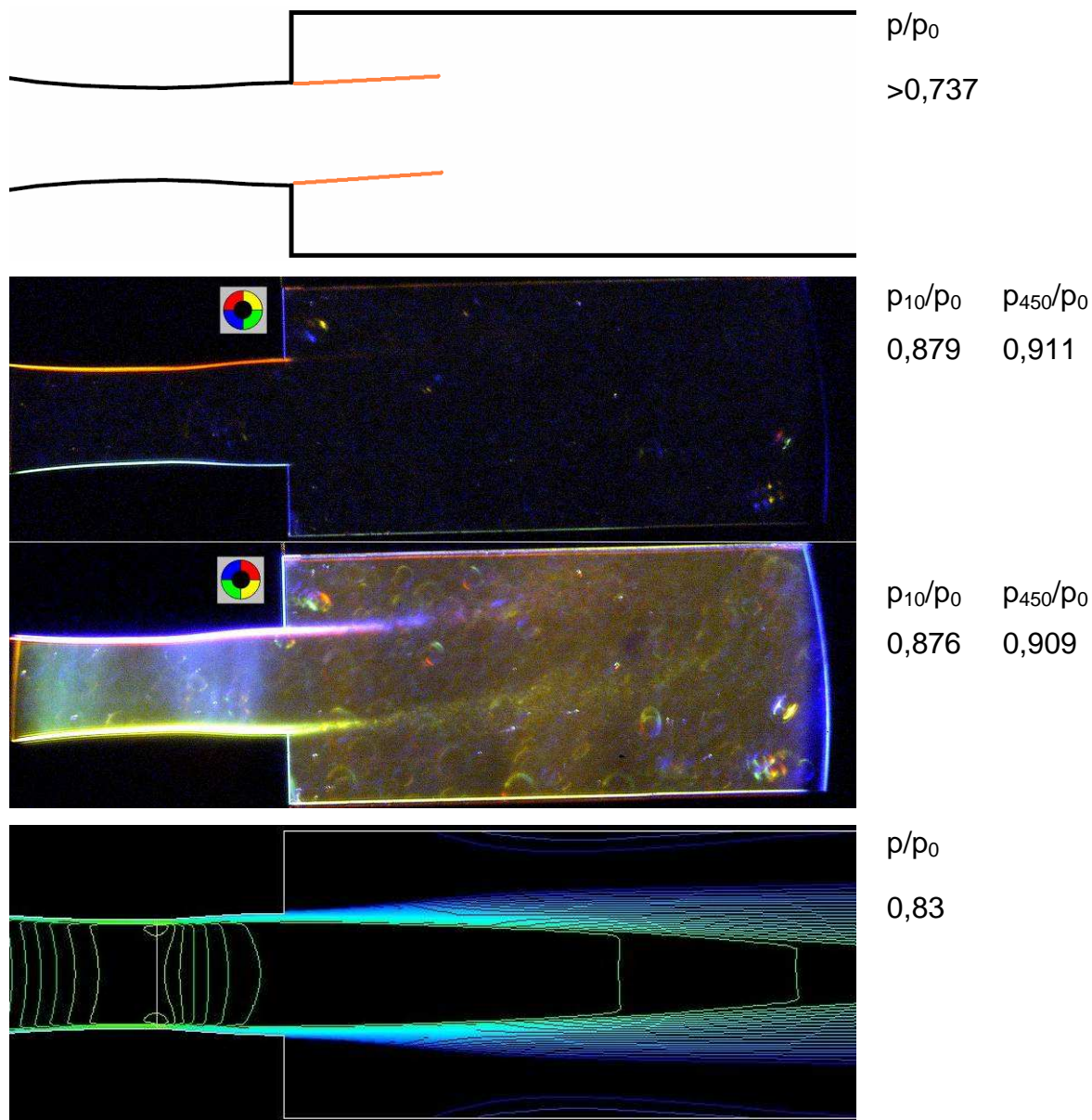
Obr. 8.1 Schéma rozmístění tlakových snímačů při experimentu, proudění zleva doprava.

Na numerické simulaci jsou zachyceny kontury Machova čísla v takovém rozsahu aby byly vidět děje stejně jako na experimentálních snímcích. Aby bylo možno se jednoduše odkazovat na jednotlivé obrázky je dodrženo toto označení:

- schéma –malované schéma proudu
- první snímek – experimentální snímek, který je úplně nahoře
- druhý snímek - experimentální snímek, který je druhý od shora
- třetí snímek- - třetí experimentální snímek (pouze u trysky $M_n=2,2$)
- simulace – kontury Machova čísla z numerické simulace

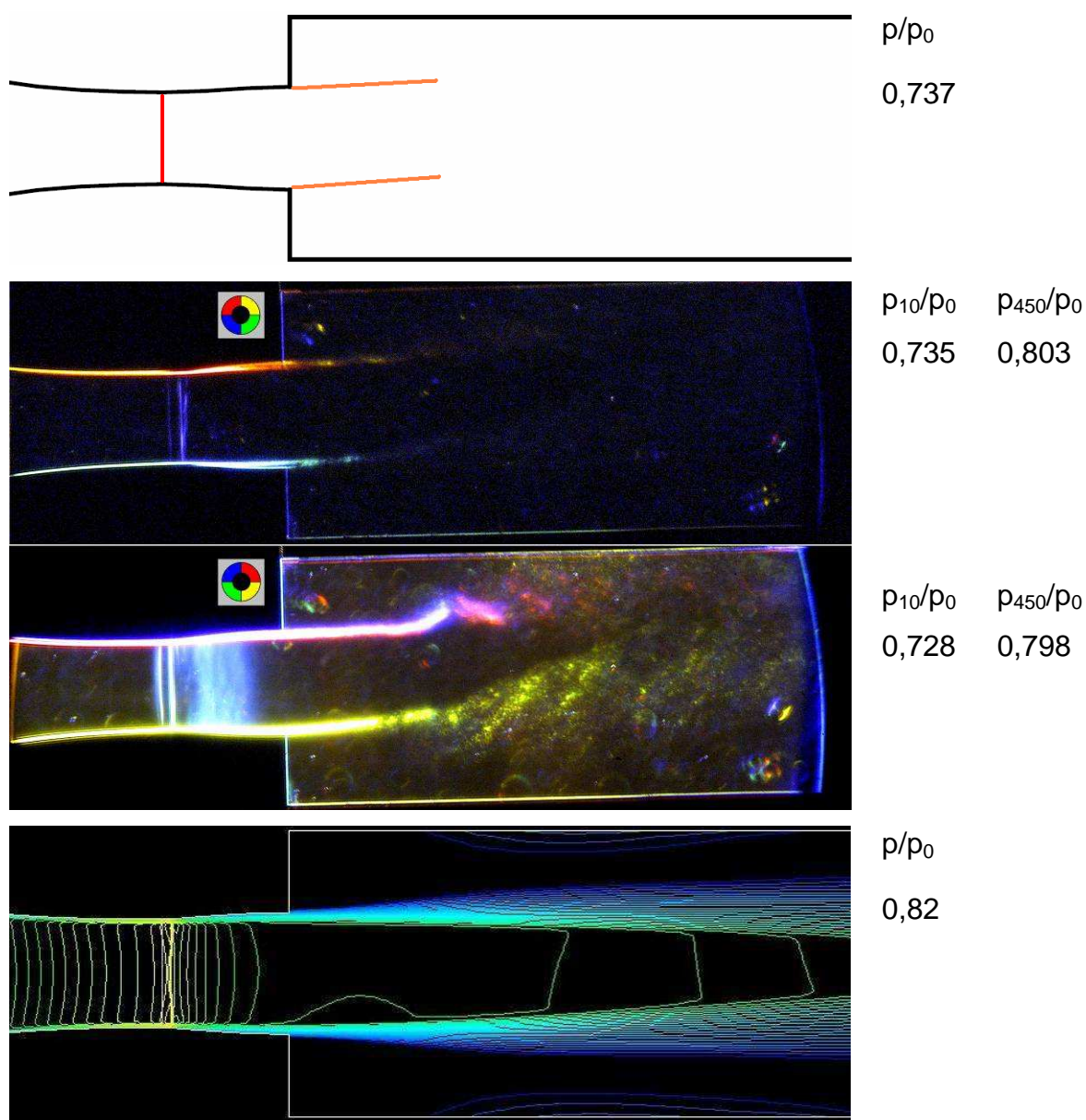
Jako první je zobrazena tryska 1,4 i když byla měřena jako poslední. Následuje $M_n=1,8$ (2. měřená) a nakonec $M_n=2,2$ (1.měřená).

8.1 Tryska $M_n=1,4$



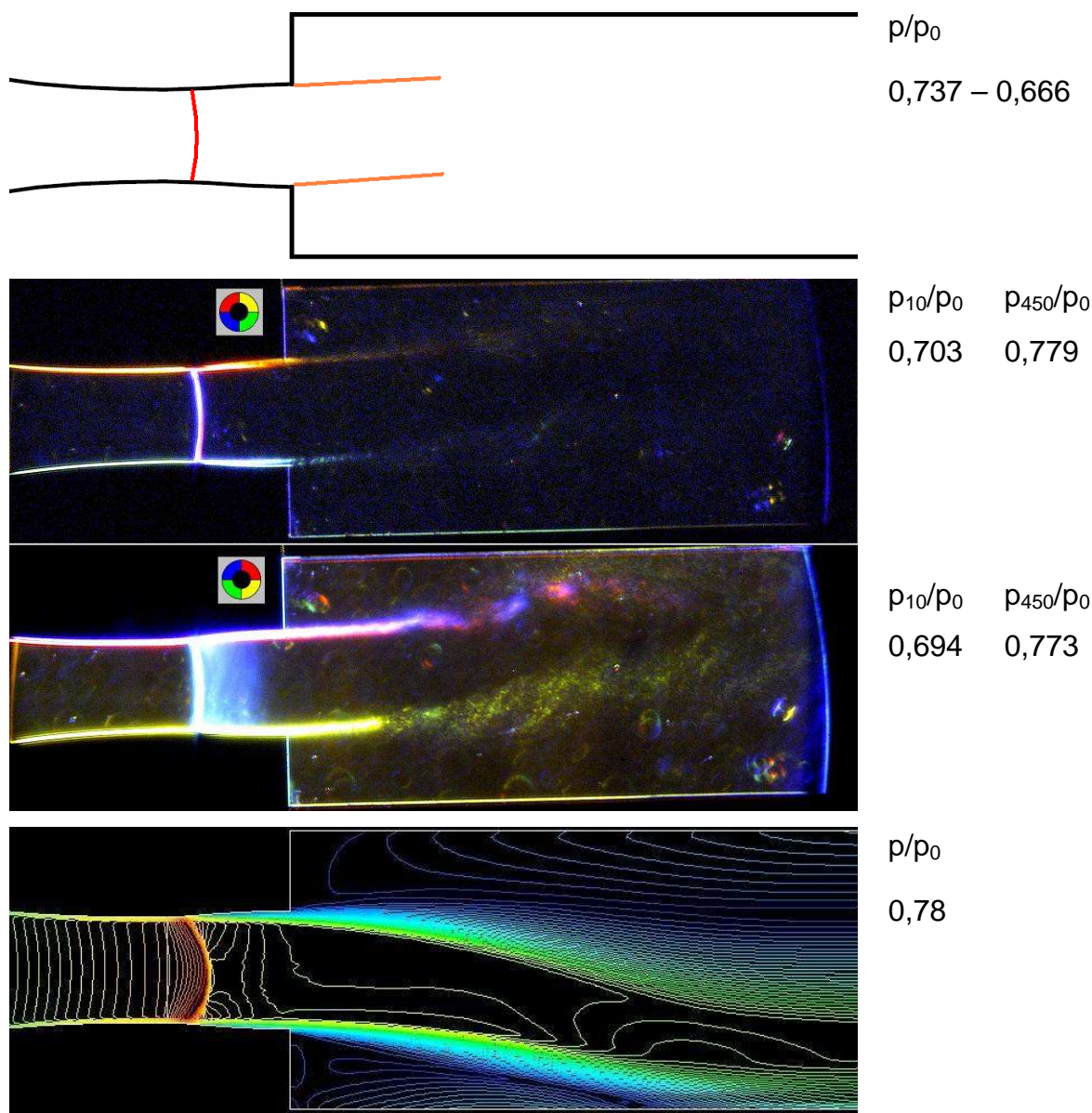
Obr. 8.2 Tryska $M_n=1,4$ podzvukový režim.

Při podzvukovém režimu dochází před hrdlem k expanzi a za hrdlem ke kompresi. Při expanzi dochází k poklesu hustoty jak je vidět na druhém snímku a na simulaci, naopak při kompresi hustota stoupá. Jelikož nikde v trysce nejsou kritické podmínky, nemůže se zde objevit ani rázová vlna. Kruhové šlíry, které jsou vidět na druhém snímku jsou způsobeny drobnými vadami v hustotě skla a nemají původ v proudění.



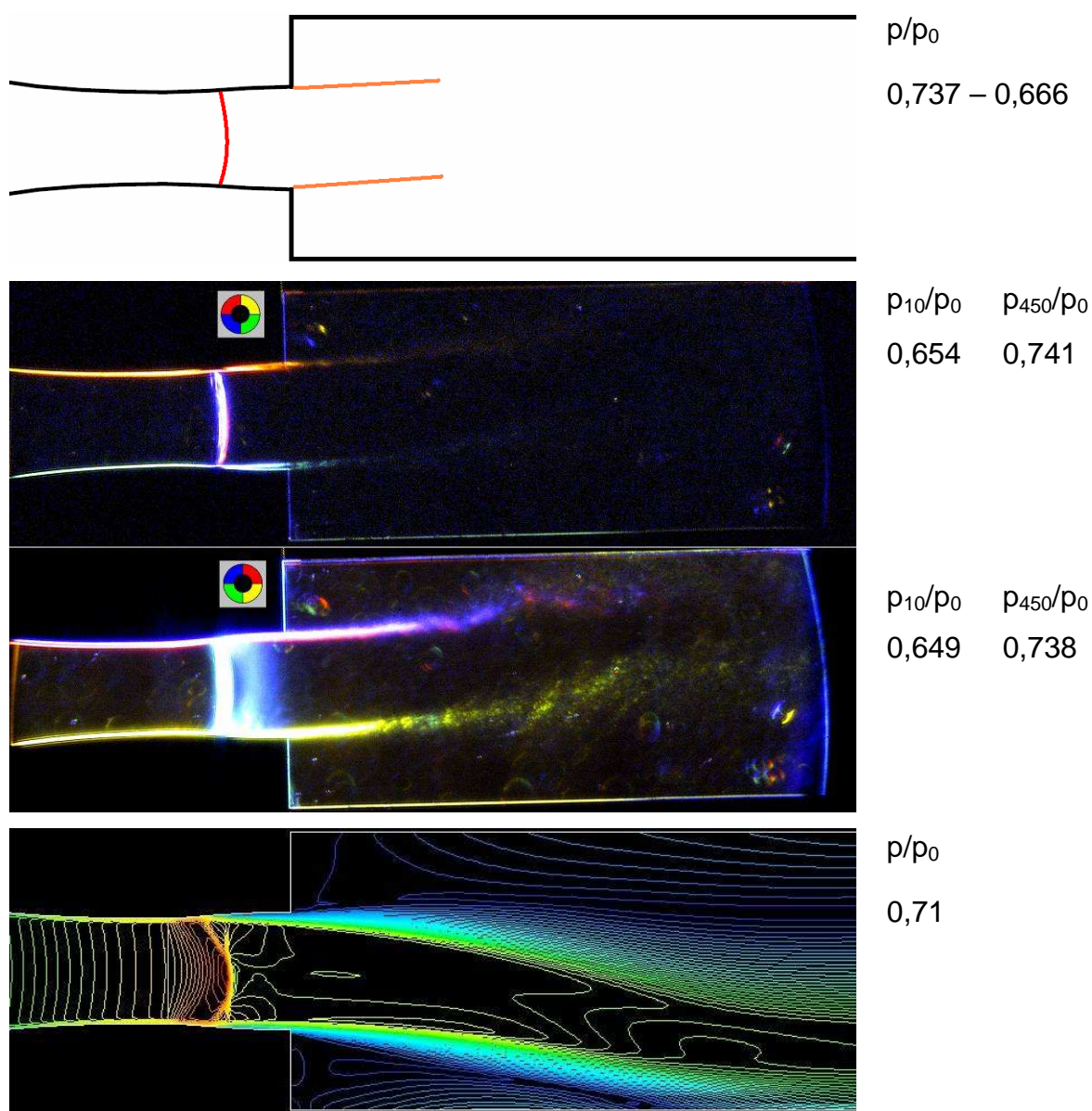
Obr. 8.3 Tryska $M_\infty=1,4$ mezní režim.

Při mezním režimu dochází k tvorbě slabé rázové vlny přímo v hrdle trysky, za ní je již proud opět podzvukový. Tento jev je zachycen na všech obrázcích.



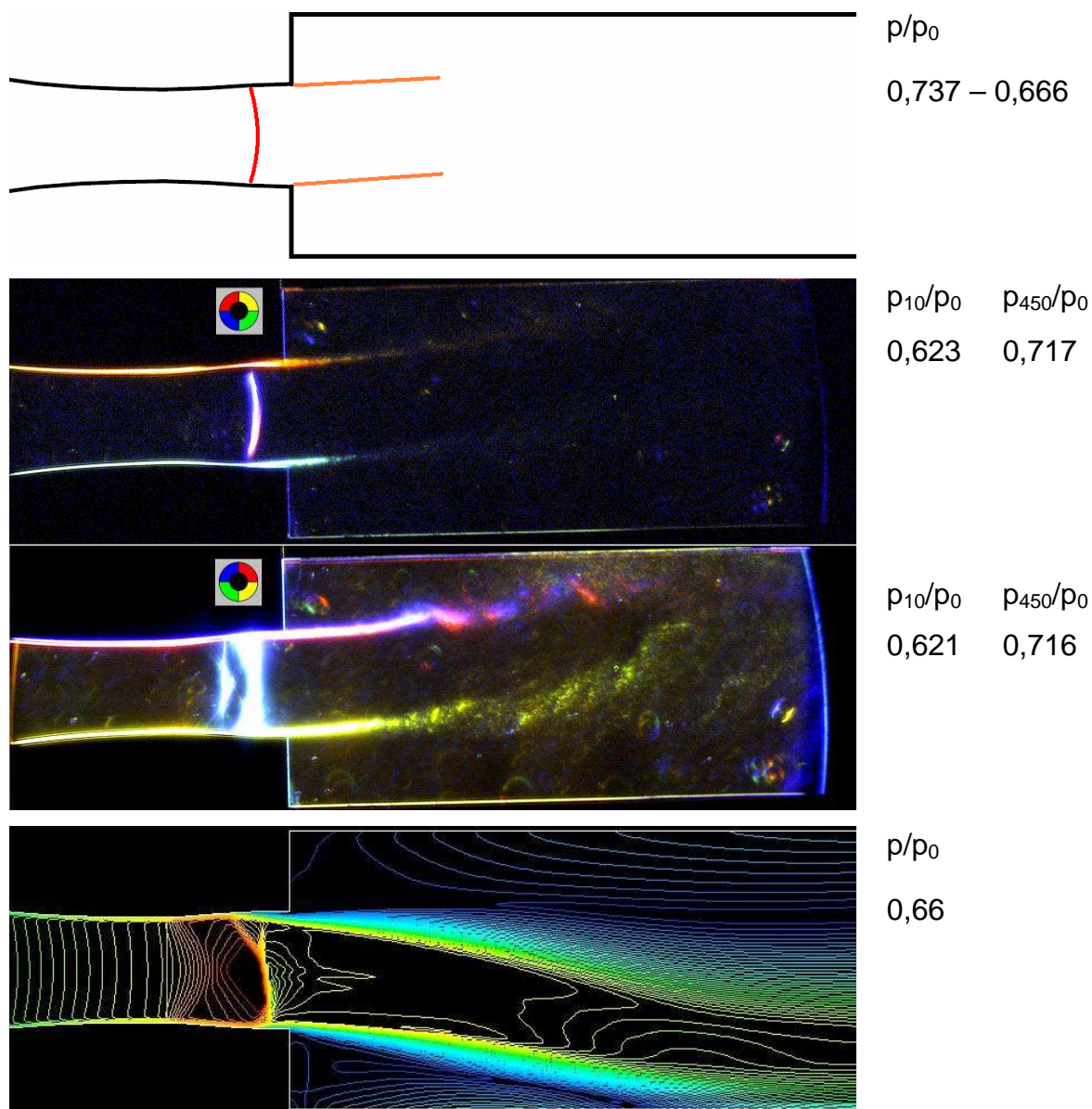
Obr. 8.4 Tryska $M_n=1,4$ rázová vlna v trysce.

S klesajícím tlakovým poměrem se posouvá rázová vlna směrem k výstupu. Čím více se blíží k výstupu tím větší rozdíl mezi Machovým číslem před a za rázovou vlnou a ta se tak stává silnější. Na těchto obrázcích lze také sledovat postupné přimykání proudu k jedné stěně vlivem vazkosti (Coandův jev). Nedošlo by k tomu pokud by byl kanál za tryskou dostatečně široký.



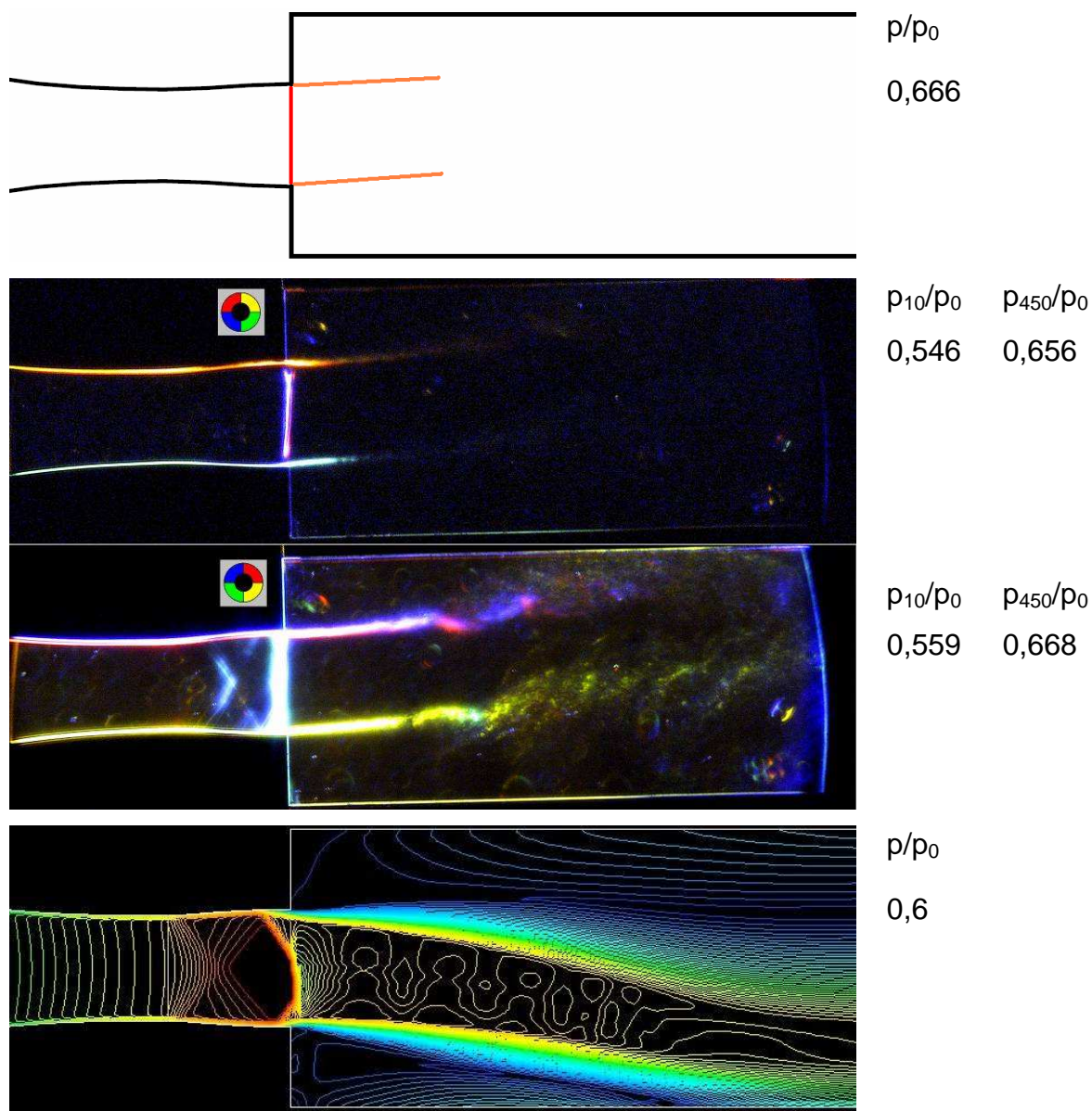
Obr. 8.5 Tryska $M_n=1,4$ rázová vlna v trysce.

Na simulaci se začíná objevovat tzv. Machova větev, která se skládá z téměř kolmé rázové vlny a šikmé rázové vlny.



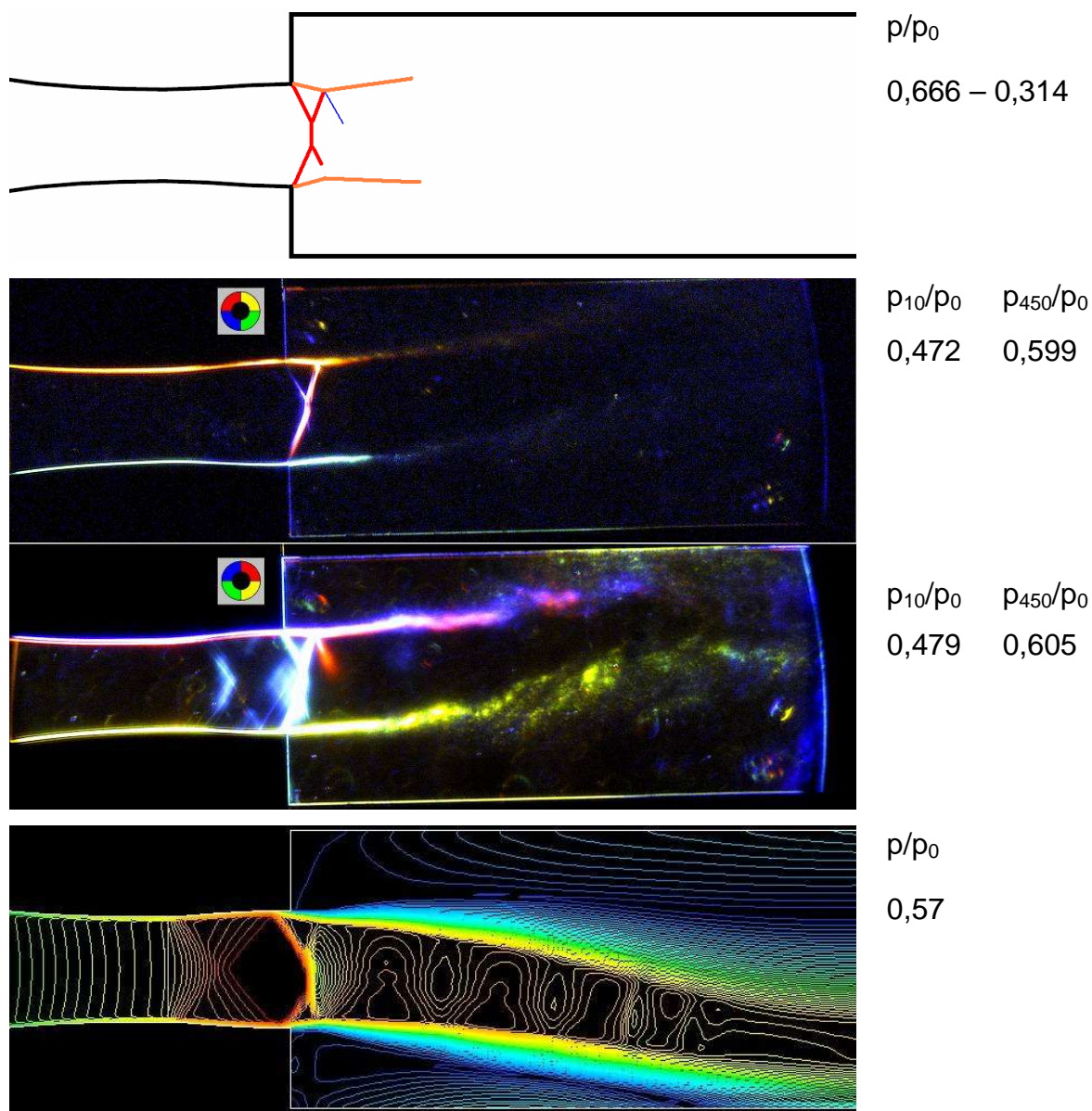
Obr. 8.6 Tryska $M_\infty=1,4$ rázová vlna v trysce.

Zde je již Machova větev patrná i na experimentálních snímcích.



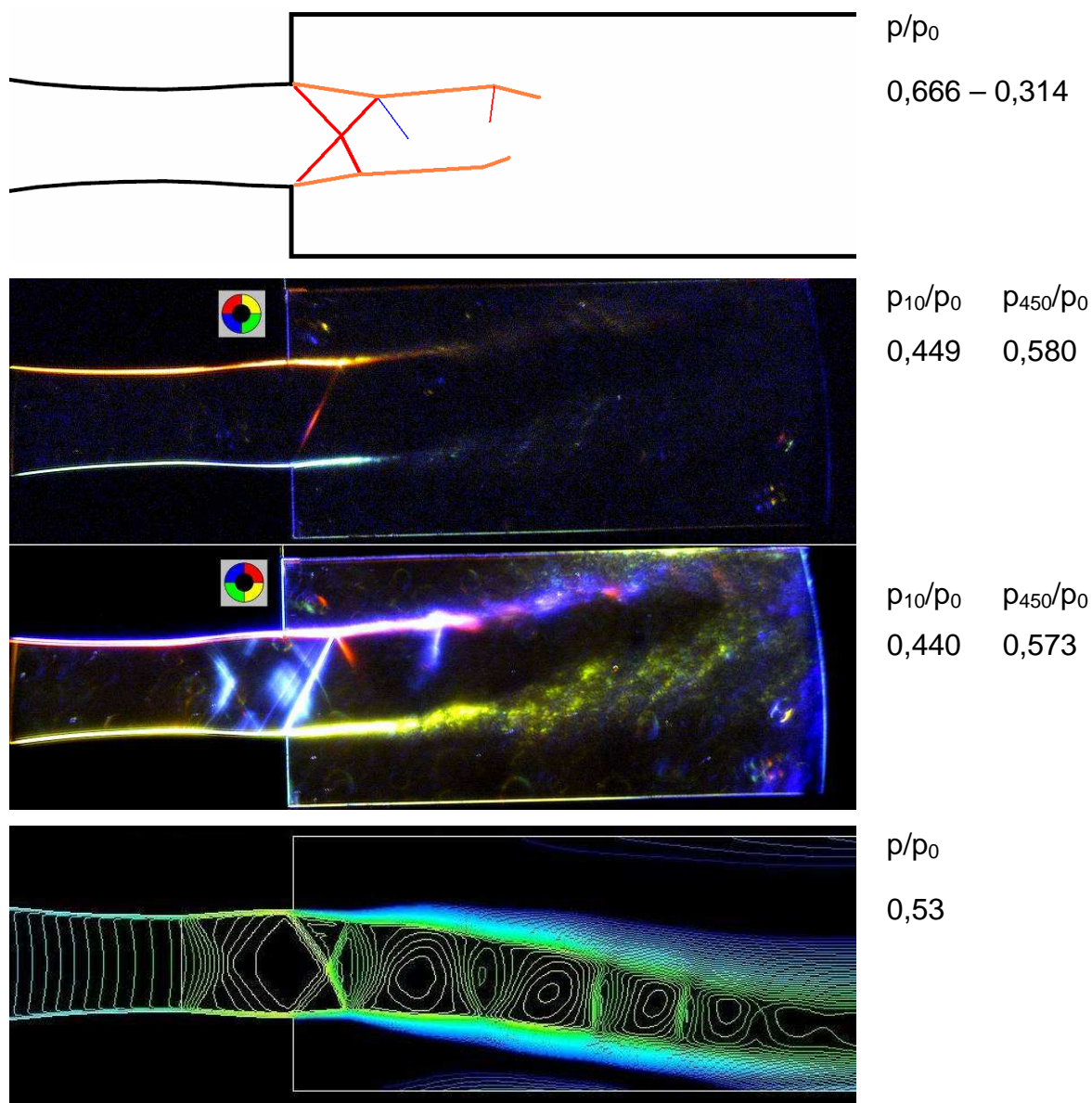
Obr. 8.7 Tryska $M_n=1,4$ rázová vlna ve výstupním průřezu.

Zatímco při experimentu došlo při obou měřeních k tvorbě kolmé rázové vlny ve výstupním průřezu, při simulaci byla tato vlna deformovaná. Došlo k odtržení proudu od stěny trysky ještě před jejím ústím.



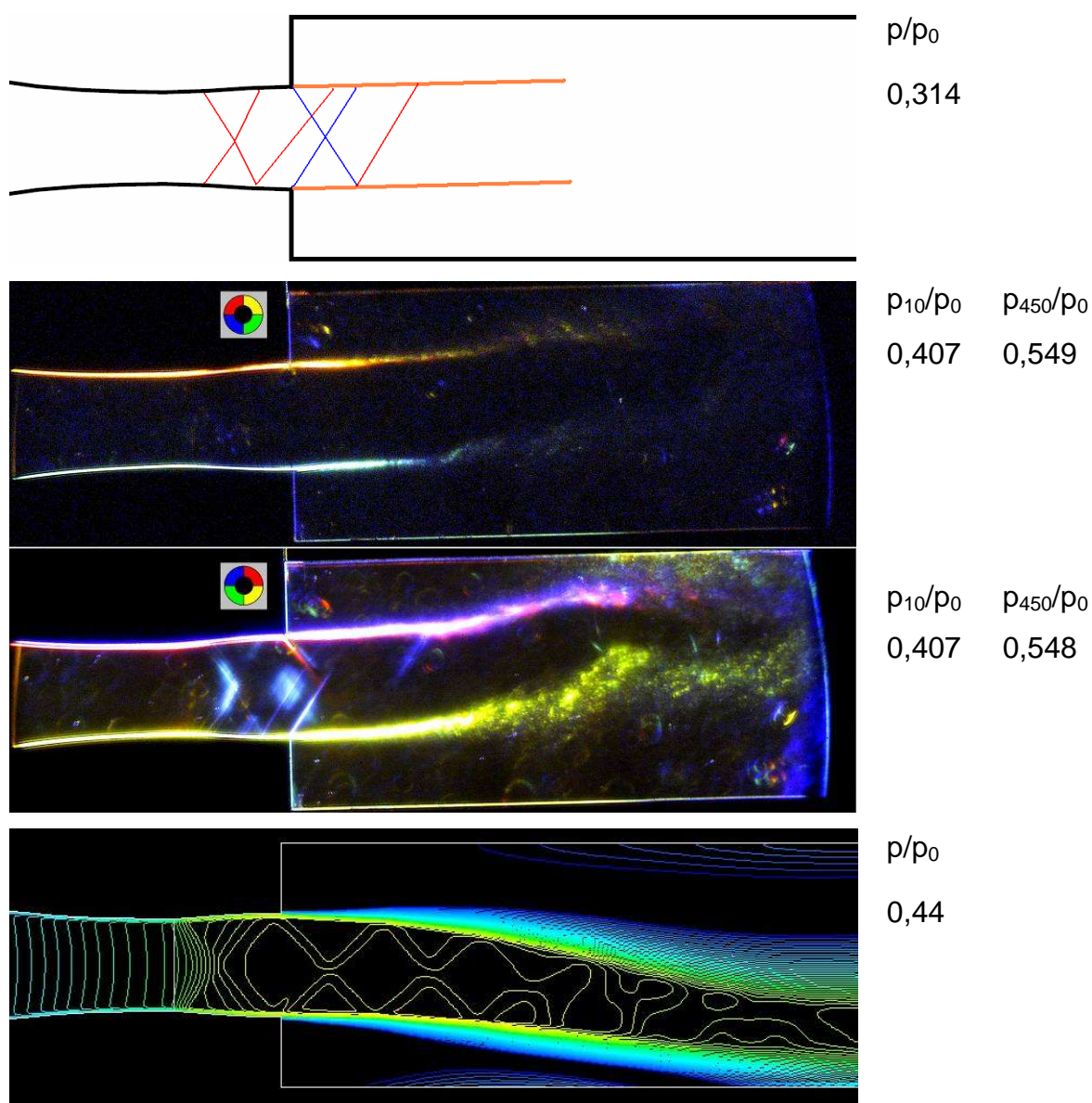
Obr. 8.8 Tryska $M_n=1,4$ přeexpandovaný proud.

Na rozdíl od experimentálních snímků dochází k odtržení proudu od trysky ještě uvnitř trysky. To má za následek rozdílný tvar rázových vln při tomto přeexpandovaném proudění.



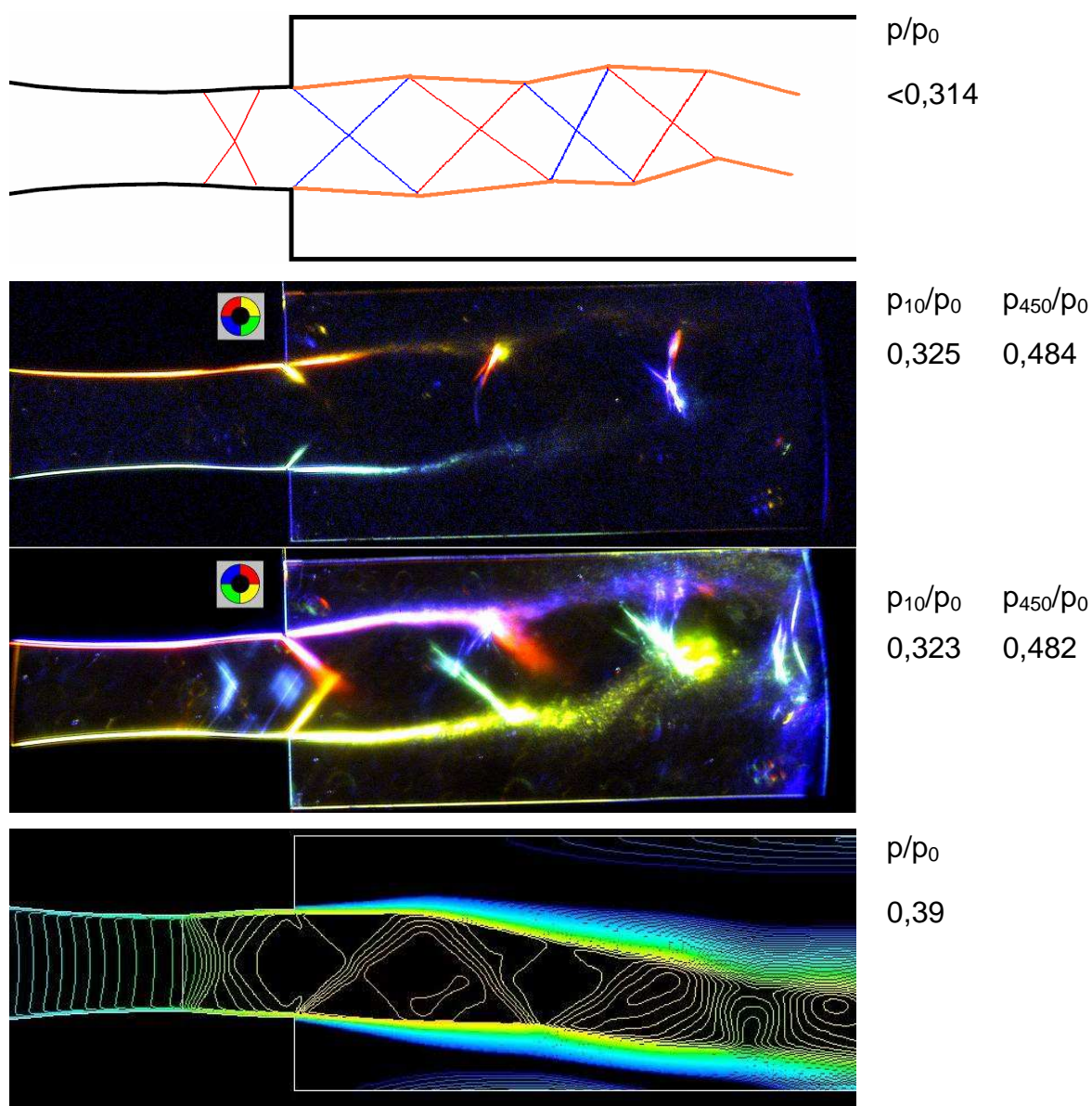
Obr. 8.9 Tryska $M_n=1,4$ přeexpandovaný proud.

Další případ přeexpandovaného proudu, tentokrát již blízko návrhovému režimu. Rázové vlny jsou slabé, hranice proudu téměř rovnoběžné.



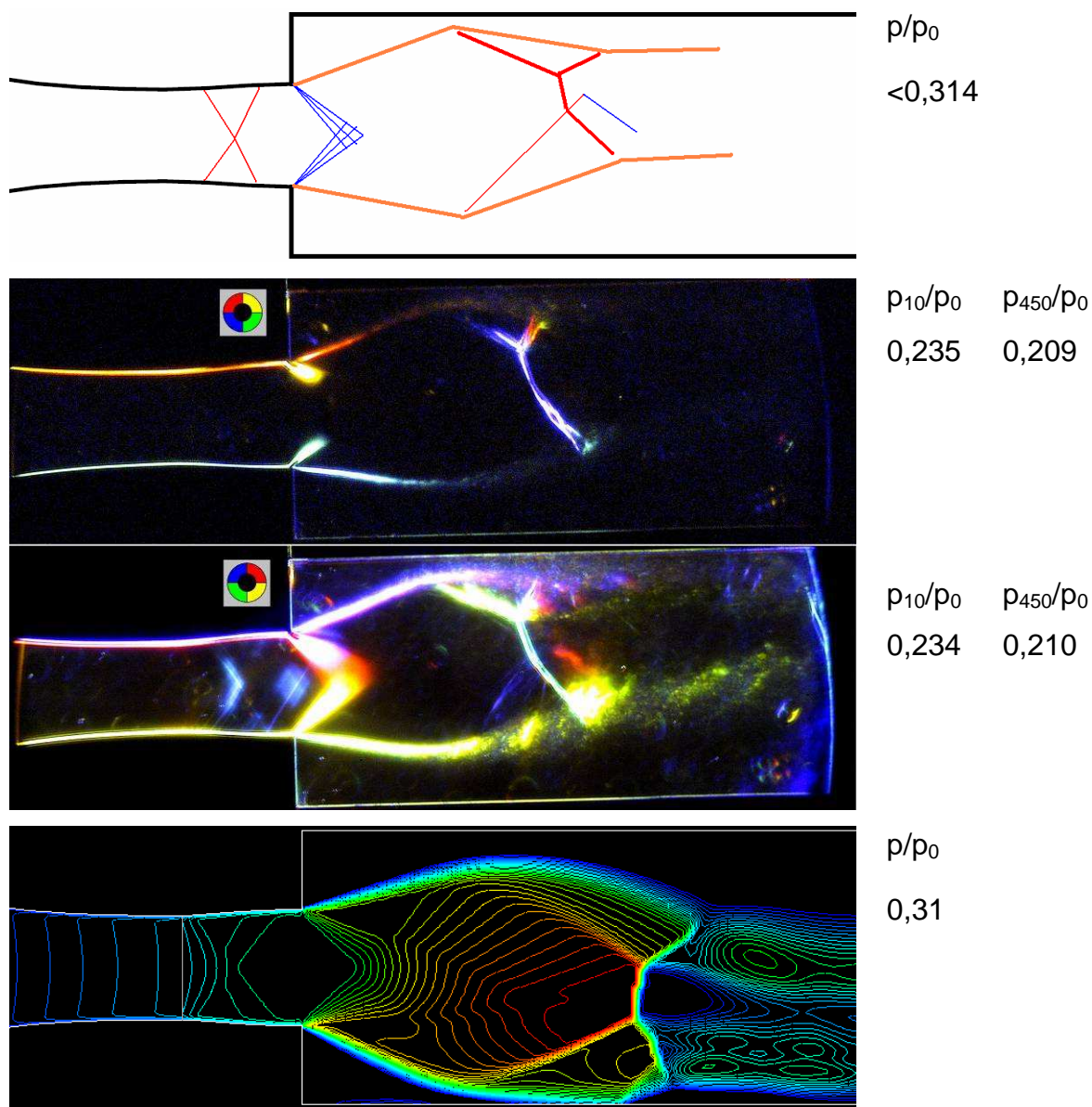
Obr. 8.10 Tryska $M_n=1,4$ návrhový režim.

Na prvním snímku je zachycen dokonalý návrhový režim, na druhém snímku je ale vidět, že zde dochází k expanzním a kompresním dějům i když velmi slabým. Na simulaci je vidět, že proud nemá homogenní rychlostní profil, jak bylo zamýšleno, ale vlivem vazkosti je mírně proměnlivý.



Obr. 8.11 Tryska $M_n=1,4$ podexpandovaný proud.

Při podexpandovaném proudění dochází k rychlé expanzi za ústím trysky a interakcí expanzních vln s hranicí proudu k následné kompresi. Tento jev se opakuje, jak je vidět především na druhém snímku a je zvýrazněn ve schématu. Při simulaci nebylo zužování a rozšiřování proudu tak výrazné jako u experimentu, nicméně je také patrné, především pro první opakování expanze – komprese.



Obr. 8.12 Tryska $M_n=1,4$ podexpandovaný proud.

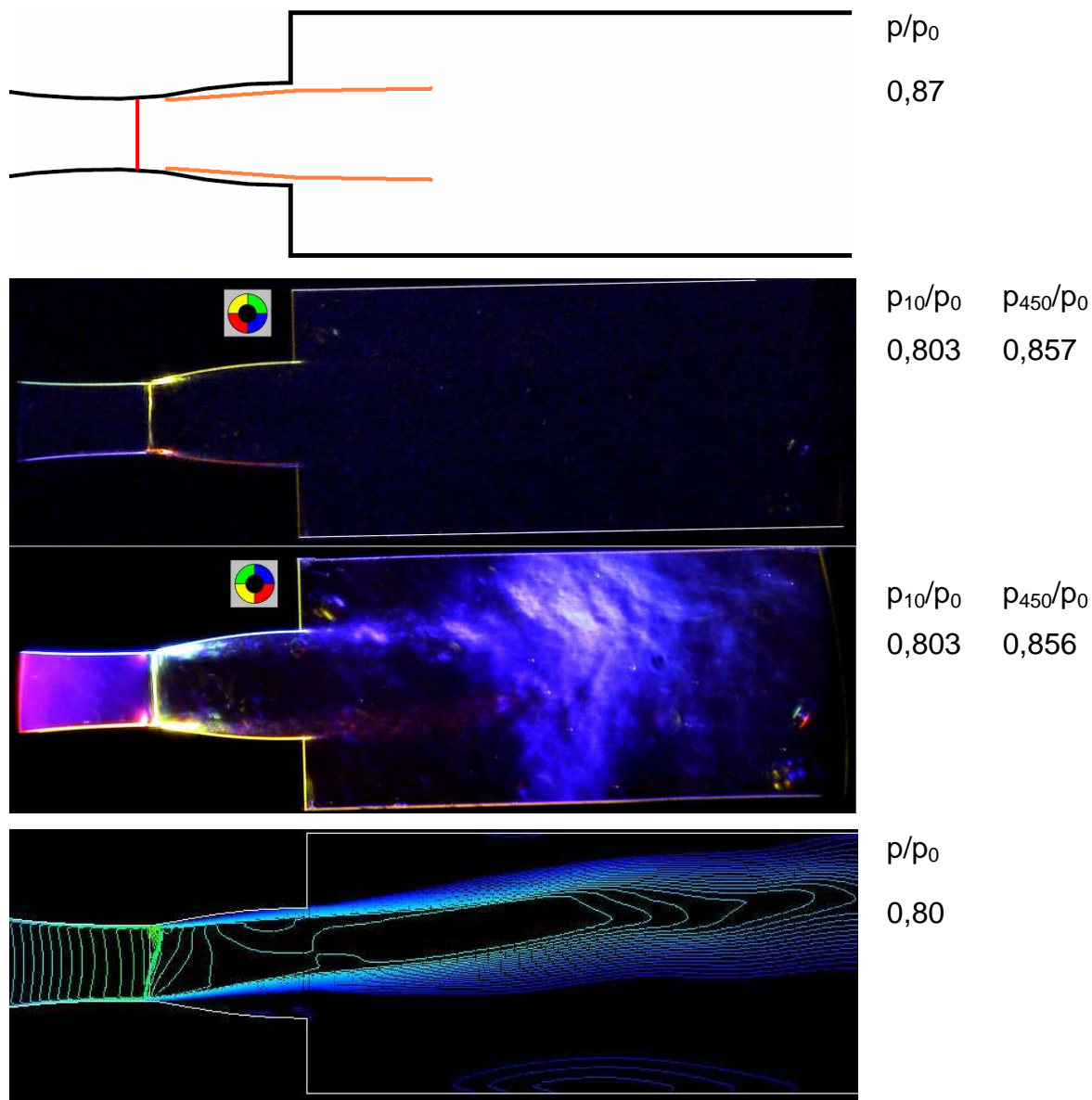
Vlivem ohnutí proudu dochází k zvýraznění jedné strany Machovy větve, kde vlnu která je vzdálenější od stěny tunelu lze považovat za kompresní nikoliv rázovou. Expanze za tryskou je již velmi výrazná vlivem vyššího rozdílu protitlaku a tlaku v ústí trysky.

Shrnutí trysky $M_n=1,4$

U této trysky se podařilo velmi zřetelně zachytit všechny režimy popsané v podkapitole 2.4. Zvláště pak režim s tryskou ve výstupním průřezu je zde krásně viditelný (obr. 8.7) i když při simulaci nebyla rázová vlna kolmá stejně jako při

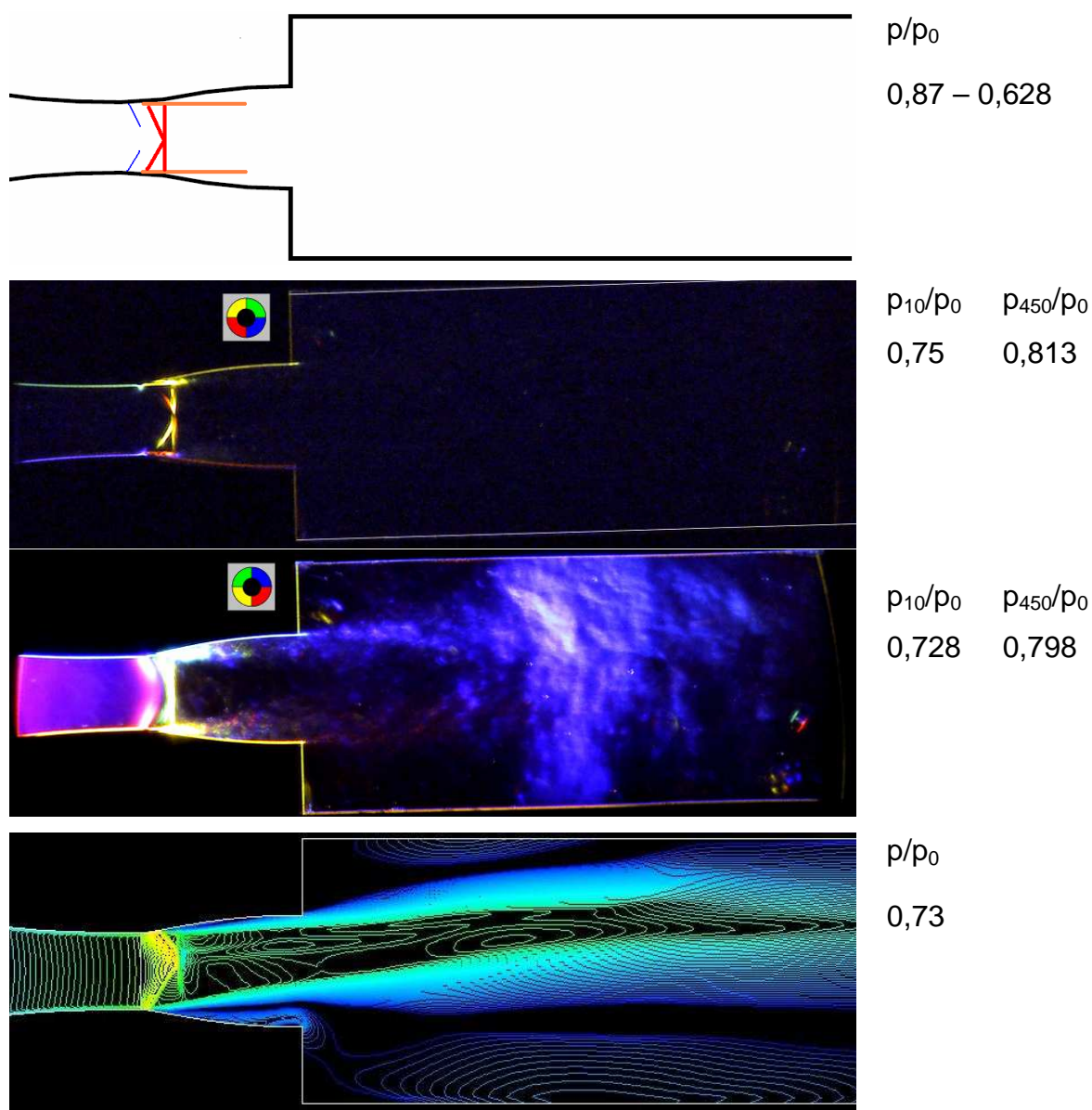
experimentu. Vlivem jen velmi mírného odklonu proudu od osy při návrhovém režimu, se podařilo zobrazit téměř dokonalý návrhový režim.

8.2 Tryska $M_n=1,8$



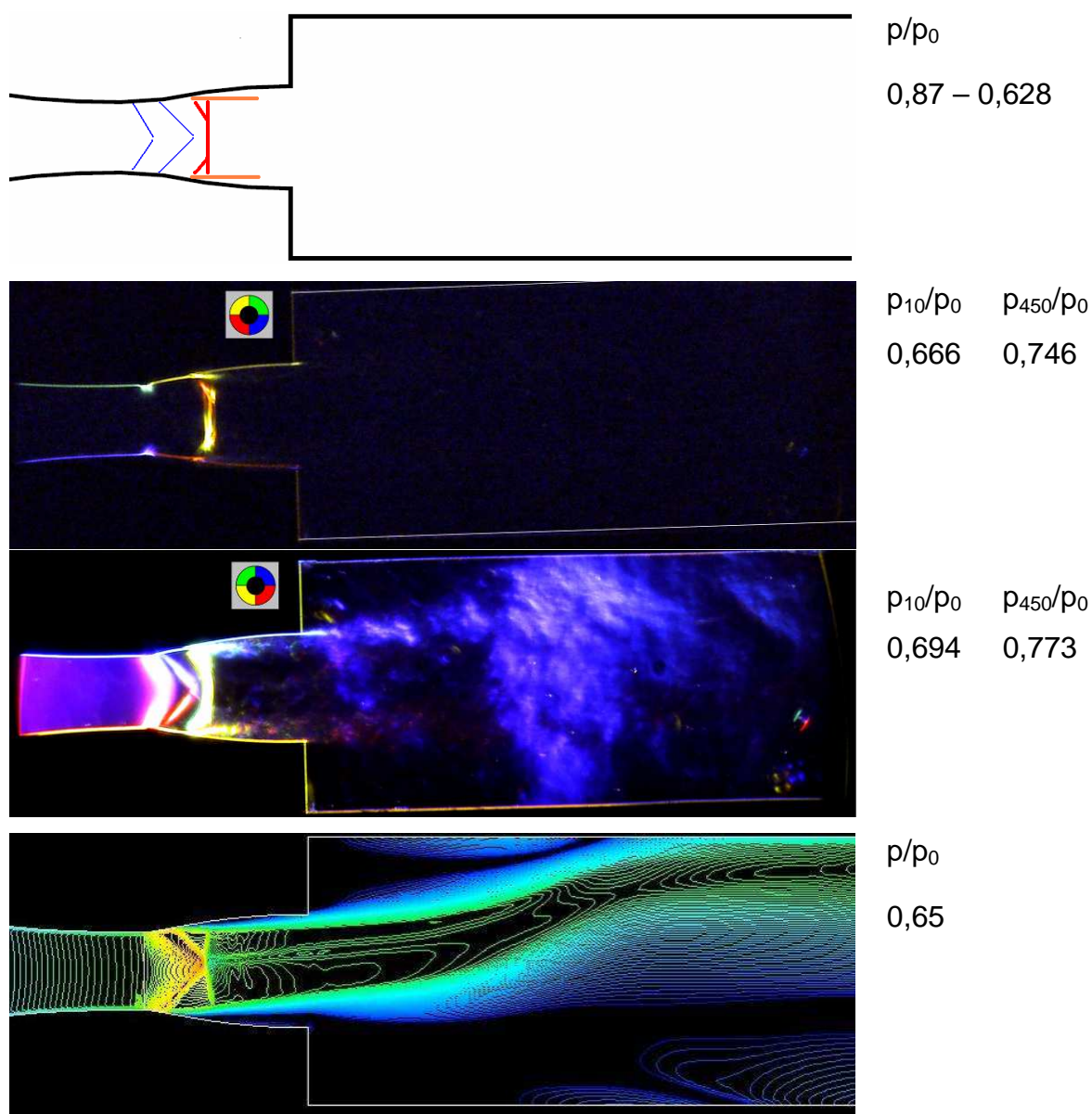
Obr. 8.13 Tryska $M_n=1,8$ mezní režim.

Kvůli většímu úhlu rozevření trysky a malému rádiusu došlo k odtržení mezní vrstvy od stěny ještě uvnitř trysky.



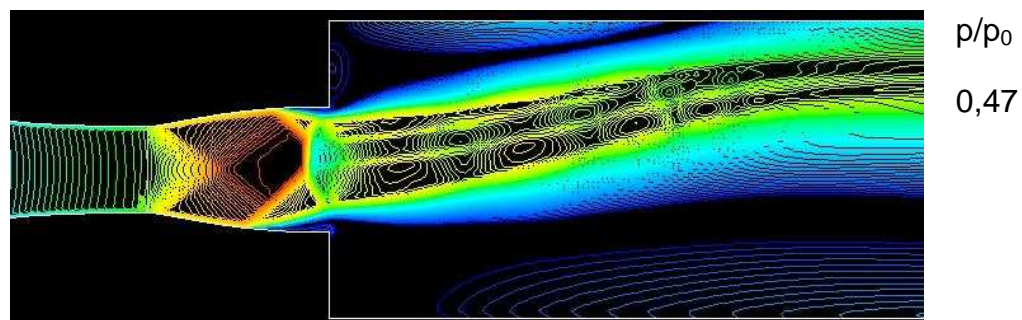
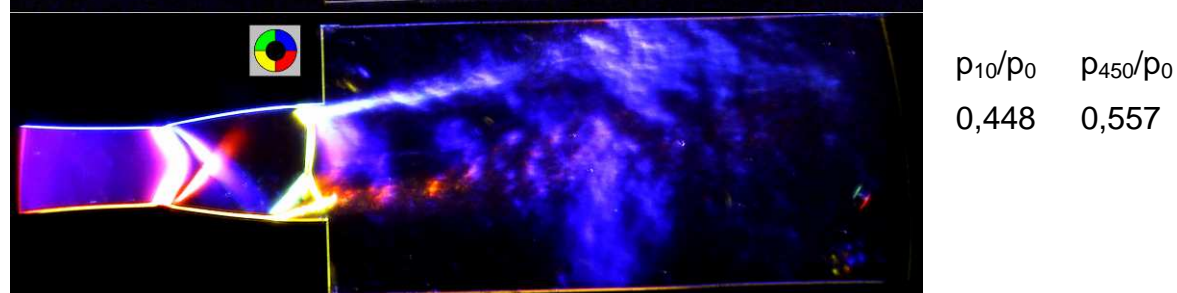
Obr. 8.14 Tryska $M_n=1,8$ rázová vlna v trysce.

K odtržení mezní vrstvy dochází i v případě, když na ni dopadne rázová vlna. Pokud se jedná o rovný kanál, mezní vrstva se opět vrátí ke stěně, ale jelikož zde se kanál rozšiřuje, dojde k jejímu trvalému odtržení.



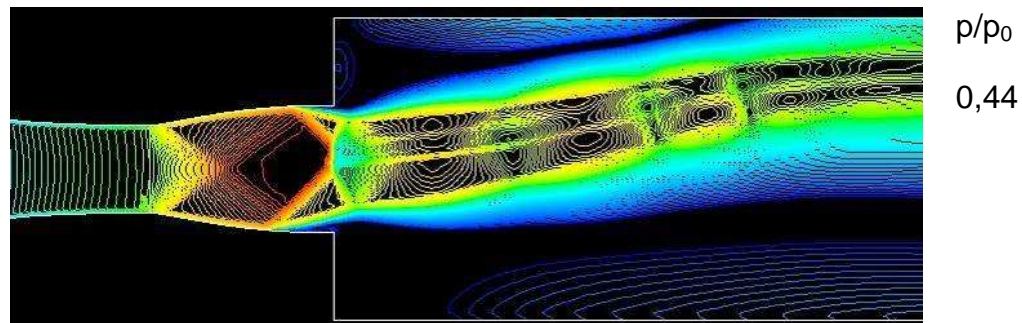
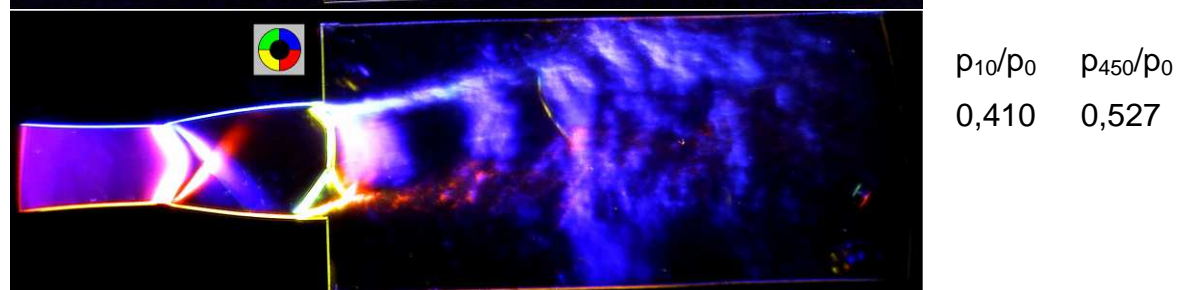
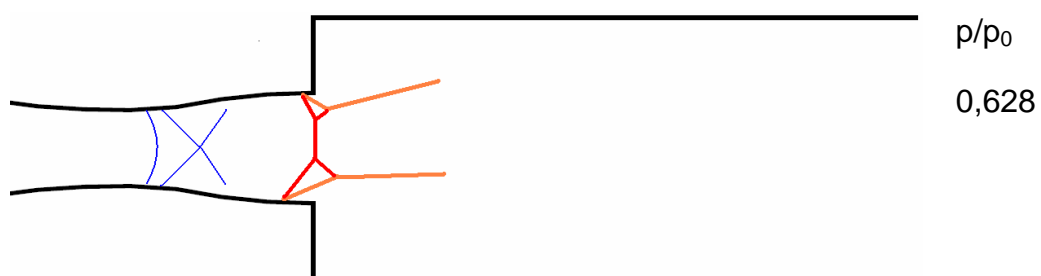
Obr. 8.15 Tryska $M_n=1,8$ rázová vlna v trysce.

S klesajícím poměrem tlaků se rázová vlna posouvá směrem z trysky ven, tj. po směru proudu. Na druhém snímku je čistě vidět expanzní vlna kousek za hrdlem trysky. Pokud by nebyl tvar trysky správně navržen (např. rovný trychtýř bez koncového zaoblení jako je na obr. 2.5) došlo by k jejímu odražení a nehomogenitě výstupního rychlostního profilu.



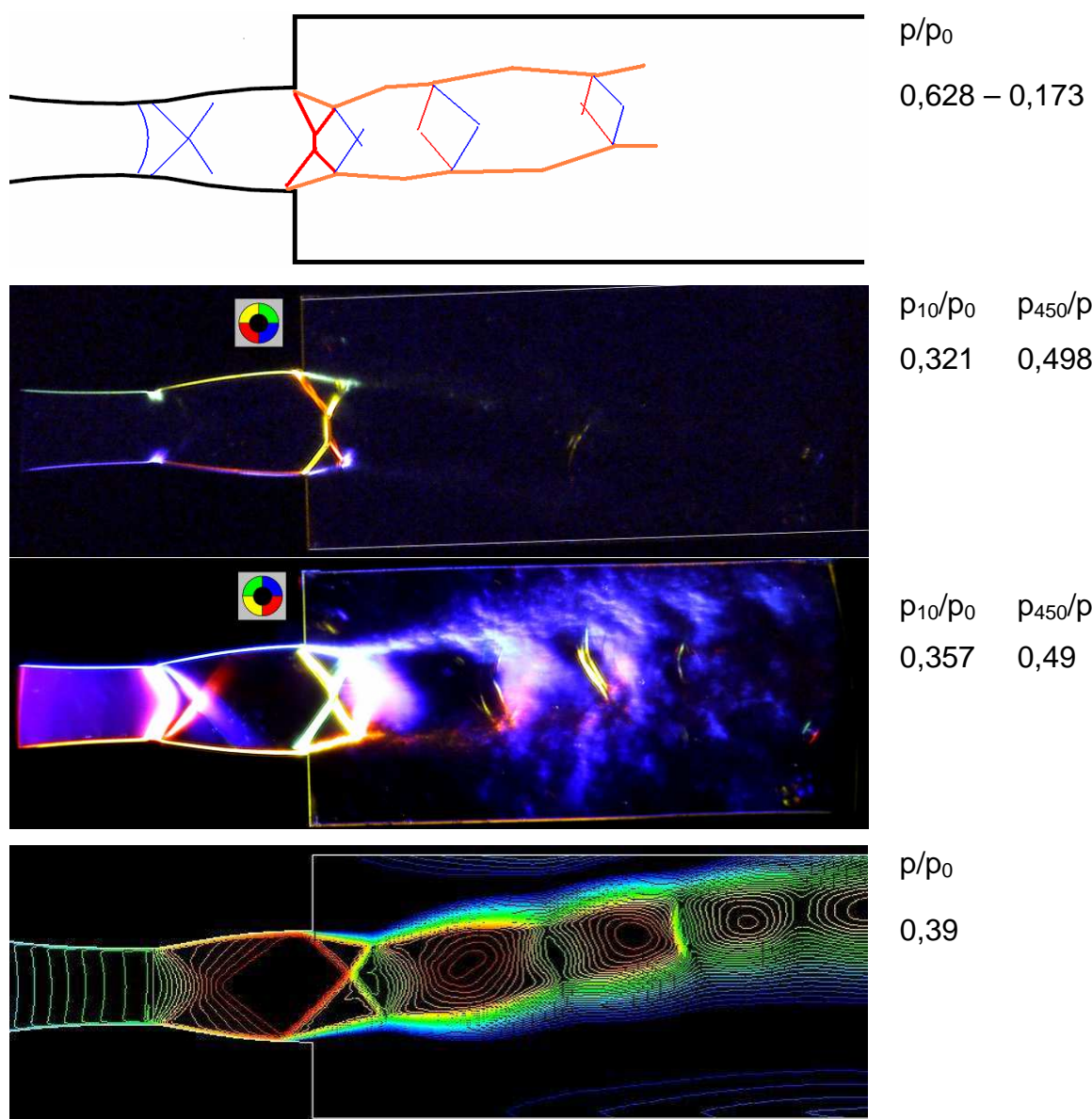
Obr. 8.16 Tryska $M_n=1,8$ rázová vlna v trysce.

V tomto případě se již výrazně projevuje Machova větev, která je deformována ohnutím proudu.



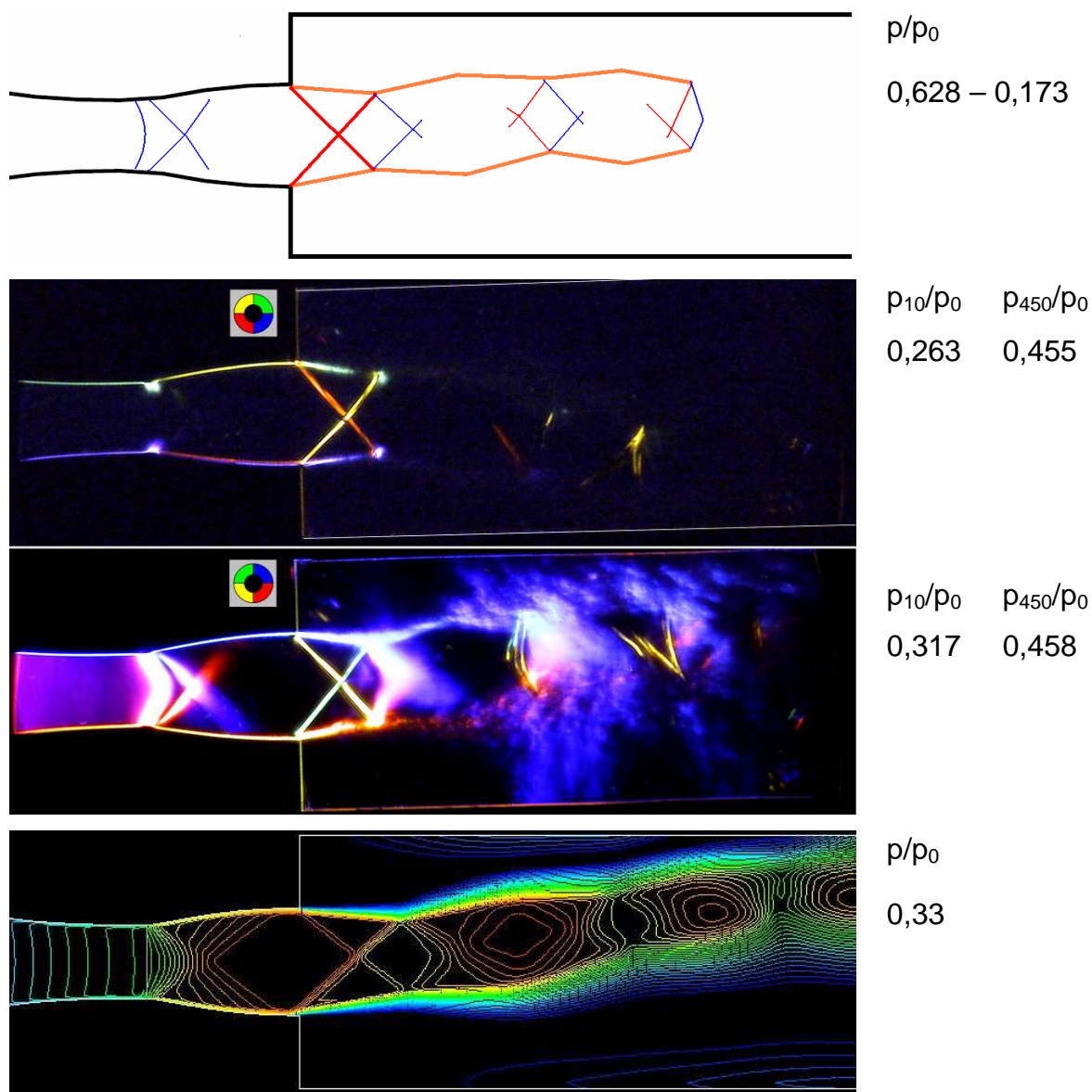
Obr. 8.17 Tryska $M_n=1,8$ rázová vlna ve výstupním průřezu.

Rázová vlna ve výstupním průřezu je přechodem mezi režimem s rázovou vlnou v trysce a režimem přeexpandovaného proudu.



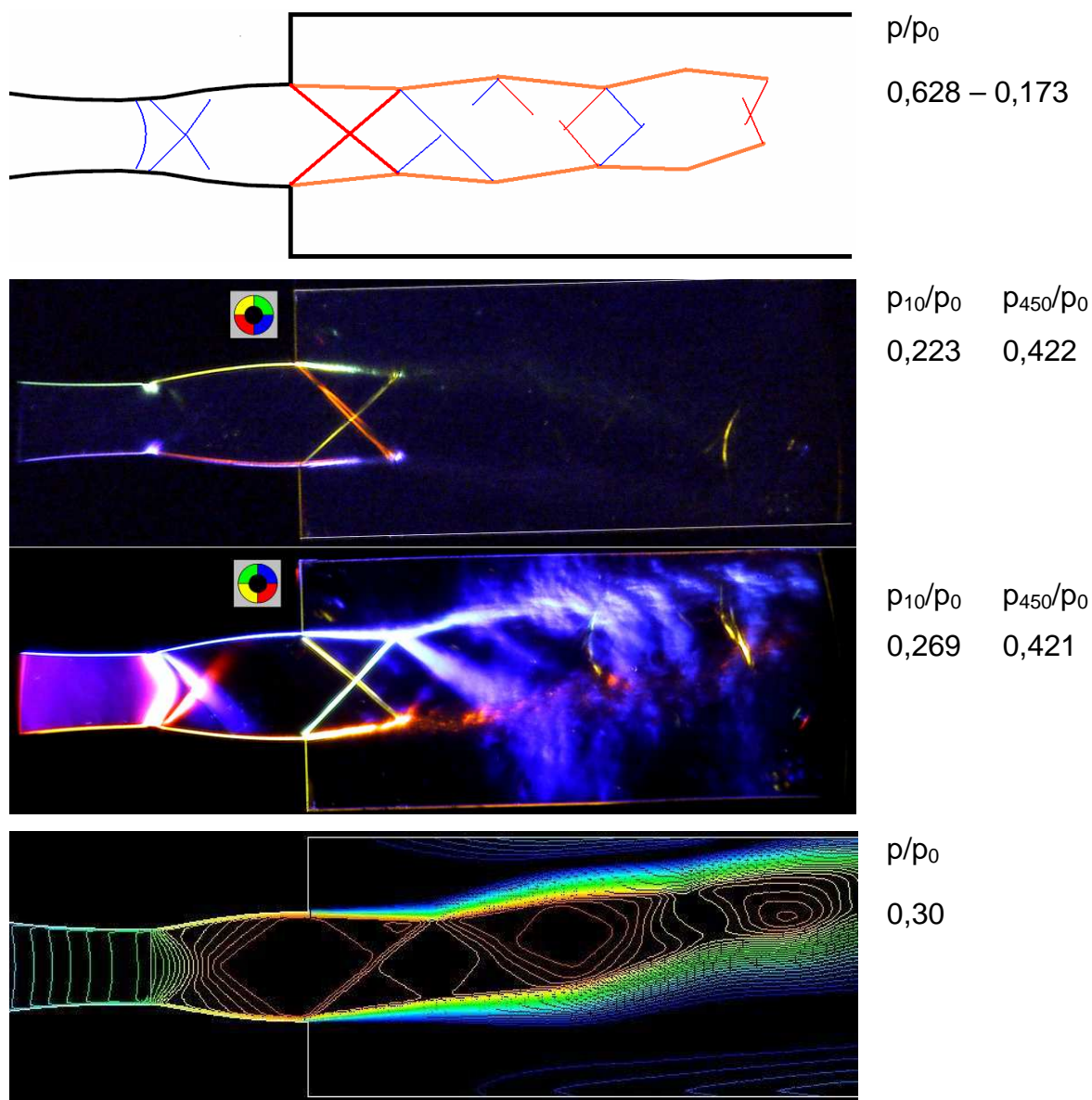
Obr. 8.18 Tryska $M_n=1,8$ přeexpandovaný proud.

Jakmile rázová vlna opustí trysku, hodnoty v ní se již dále nemění. Ať už se jedná o rychlostní profil, tlakové pole nebo pole hustoty.



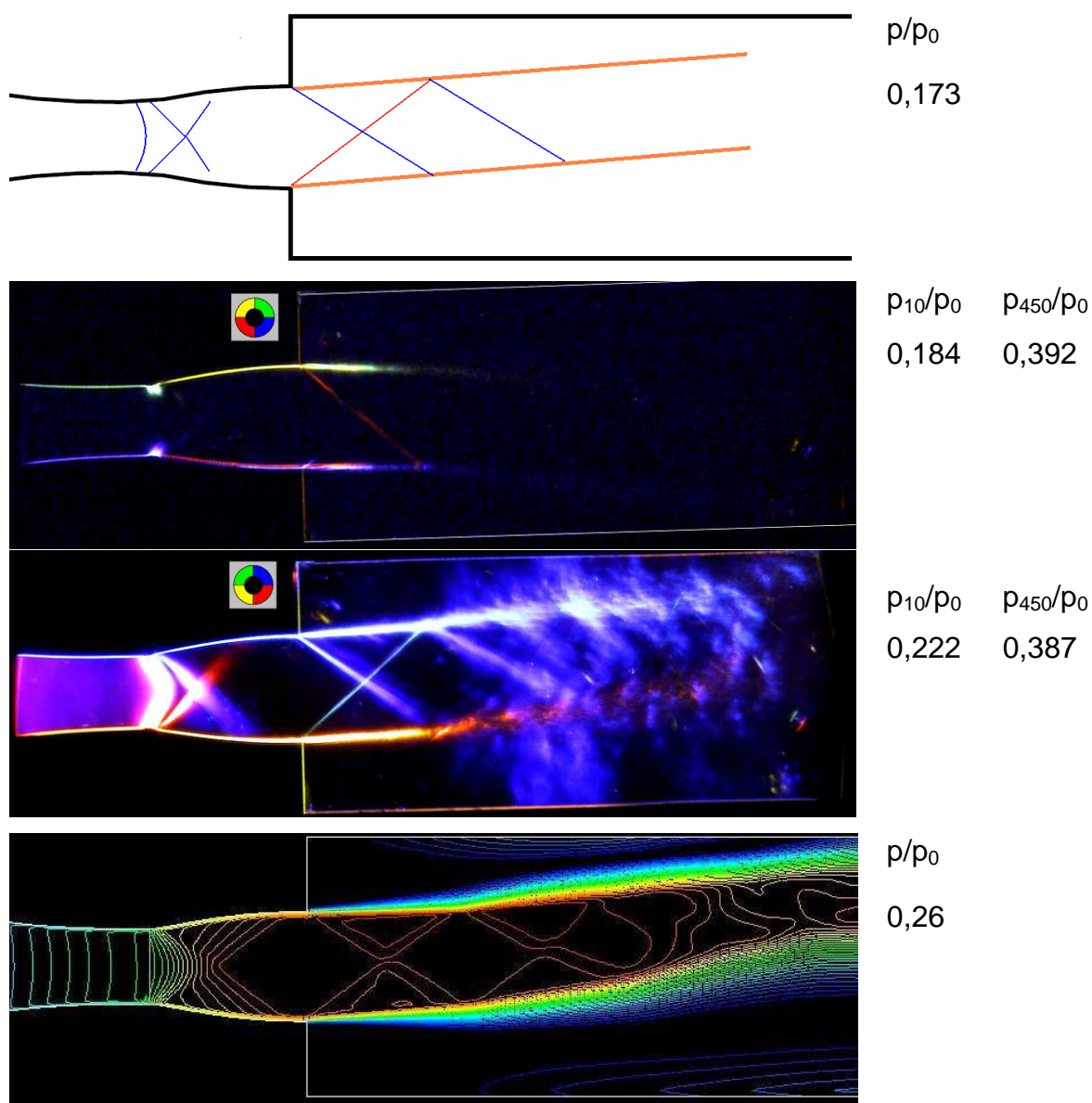
Obr. 8.19 Tryska $M_n=1,8$ přeexpandovaný proud.

Na těchto obrázcích je jasně viditelná struktura opakujících kompresních a expanzních vln začínajících rázovou vlnou. Na experimentálních snímcích nejsou ale tyto vlny vidět celé, protože se vzdáleností od svého začátku se zeslabují. Zeslabování vln je rovněž patrné na simulaci.



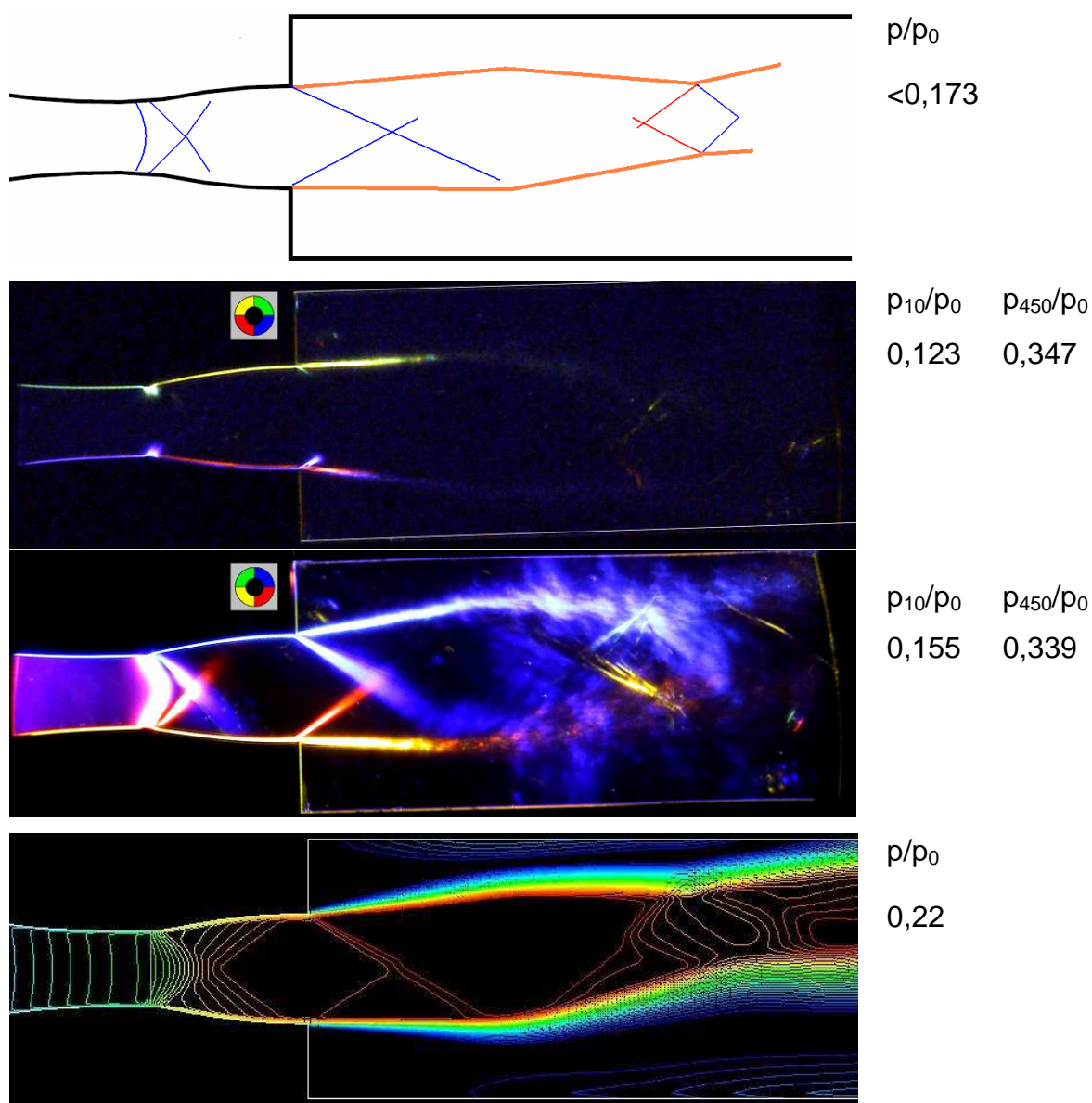
Obr. 8.20 Tryska $M_n=1,8$ přeexpandovaný proud.

Při tomto stavu se velice shoduje druhý snímek a simulace. Na obou se horní část, až po rázovou vlnu, chová téměř jako návrhový režim, jemuž se však nejvíce přiblížil teprve následující režim (obr. 8.21).



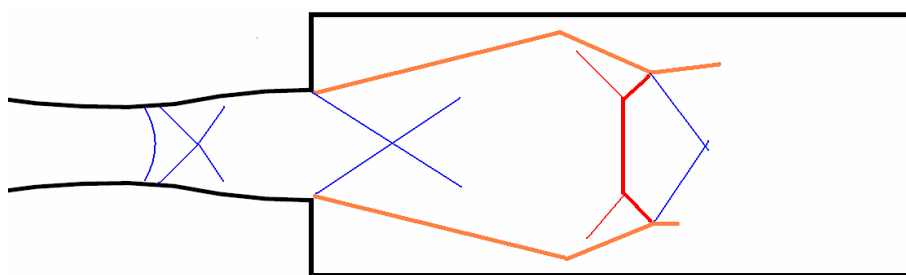
Obr. 8.21 Tryska $M_n=1,8$ návrhový režim.

Na obr. 8.21 je vidět režim velmi blízký návrhovému, kdy by měly hranice proudu být rovnoběžné přímky, v ideálním případě rovnoběžné s osou kanálu. Proud se přisává k jedné straně, protože kanál není dostatečně široký a projevuje se zde vliv vazkosti. Proud se může přiklonit k horní nebo dolní straně, ale jakmile jednou „zvolí“ stranu, už na ní zůstane. Právě ohybem proudu dochází k nesymetričnosti proudění a může pak nastat jev, kdy z horního rohu trysky vychází expanzní vlna a z dolního kompresní, jako je tomu při tomto režimu (viz schéma).

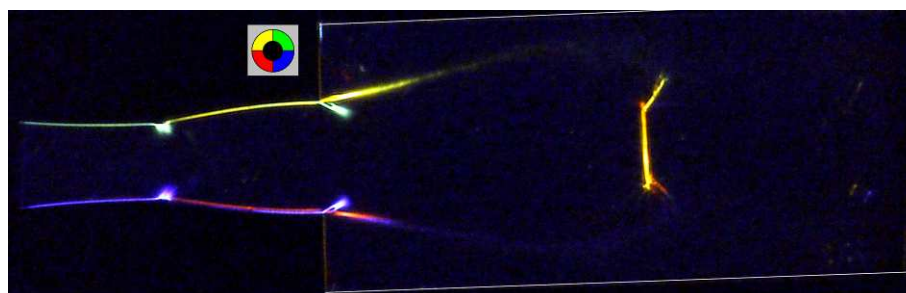


Obr. 8.22 Tryska $M_n=1,8$ podexpandovaný proud.

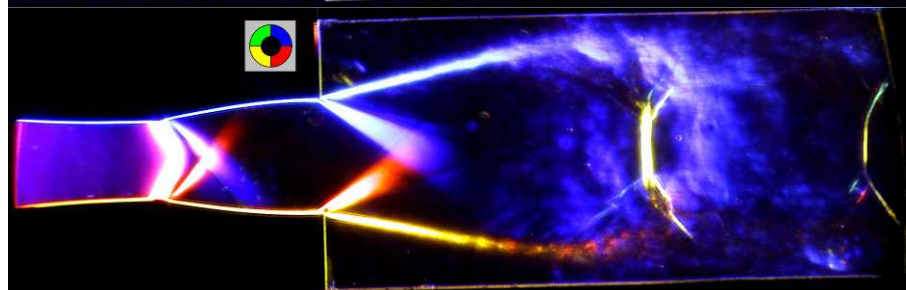
Na druhém snímku je vidět podobnost proudění za hrdlem a za ústím trysky. V obou místech dochází k výrazné expanzi proudu. Při těchto režimech se již simulace začala značně vzdalovat od experimentálně pořízených snímků. To je pravděpodobně způsobeno zúžením průřezu mimo viditelnou část rozpěrnými plechy.



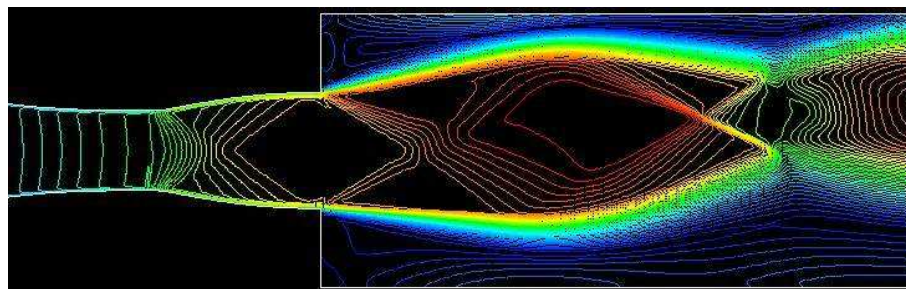
p/p_0
 $<0,173$



p_{10}/p_0 p_{450}/p_0
 0,108 0,323

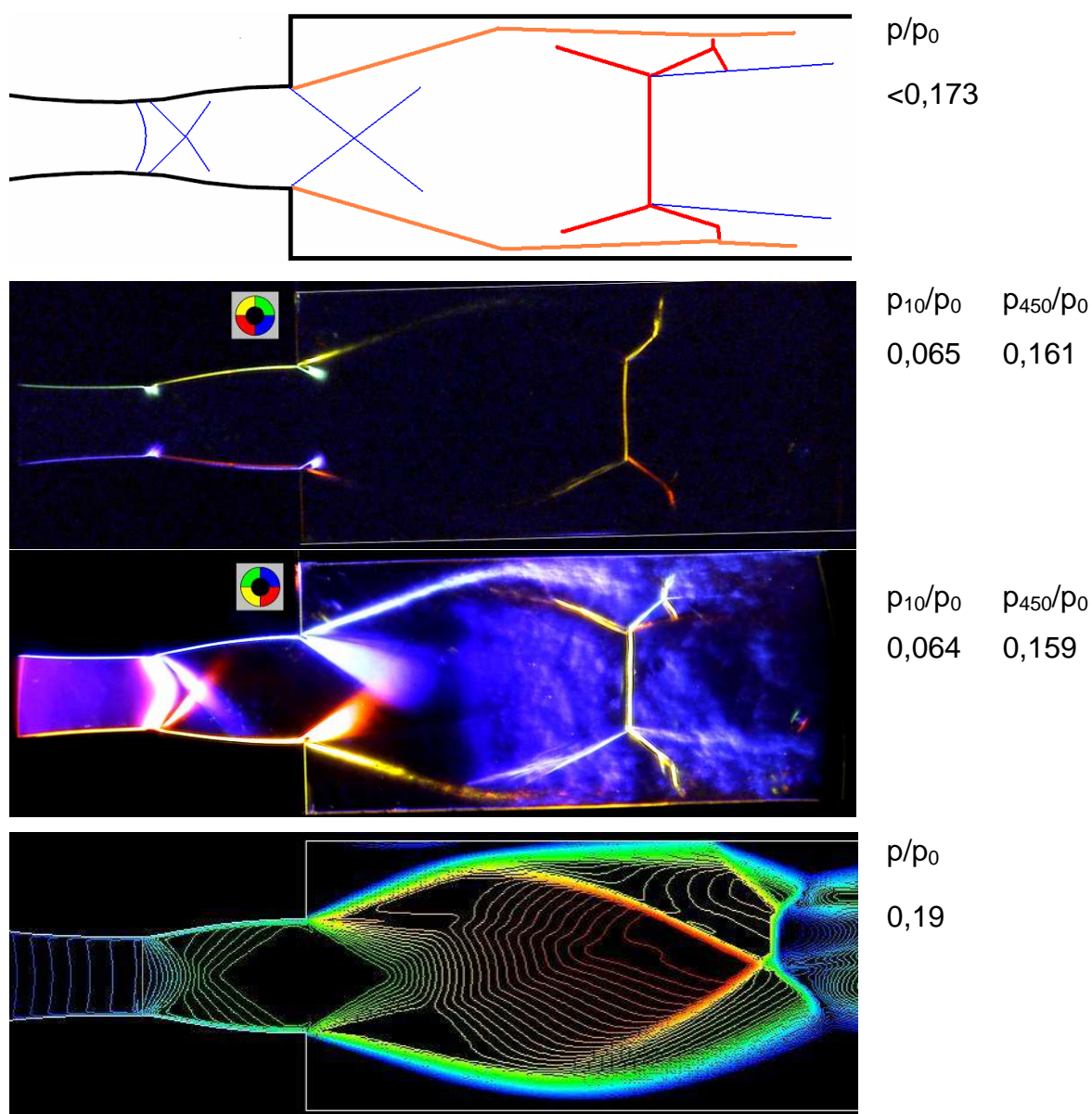


p_{10}/p_0 p_{450}/p_0
 0,102 0,32



p/p_0
 0,2

Obr. 8.23 Tryska $M_n=1,8$ podexpandovaný proud.



Obr. 8.24 Tryska $M_n=1,8$ podexpandovaný proud.

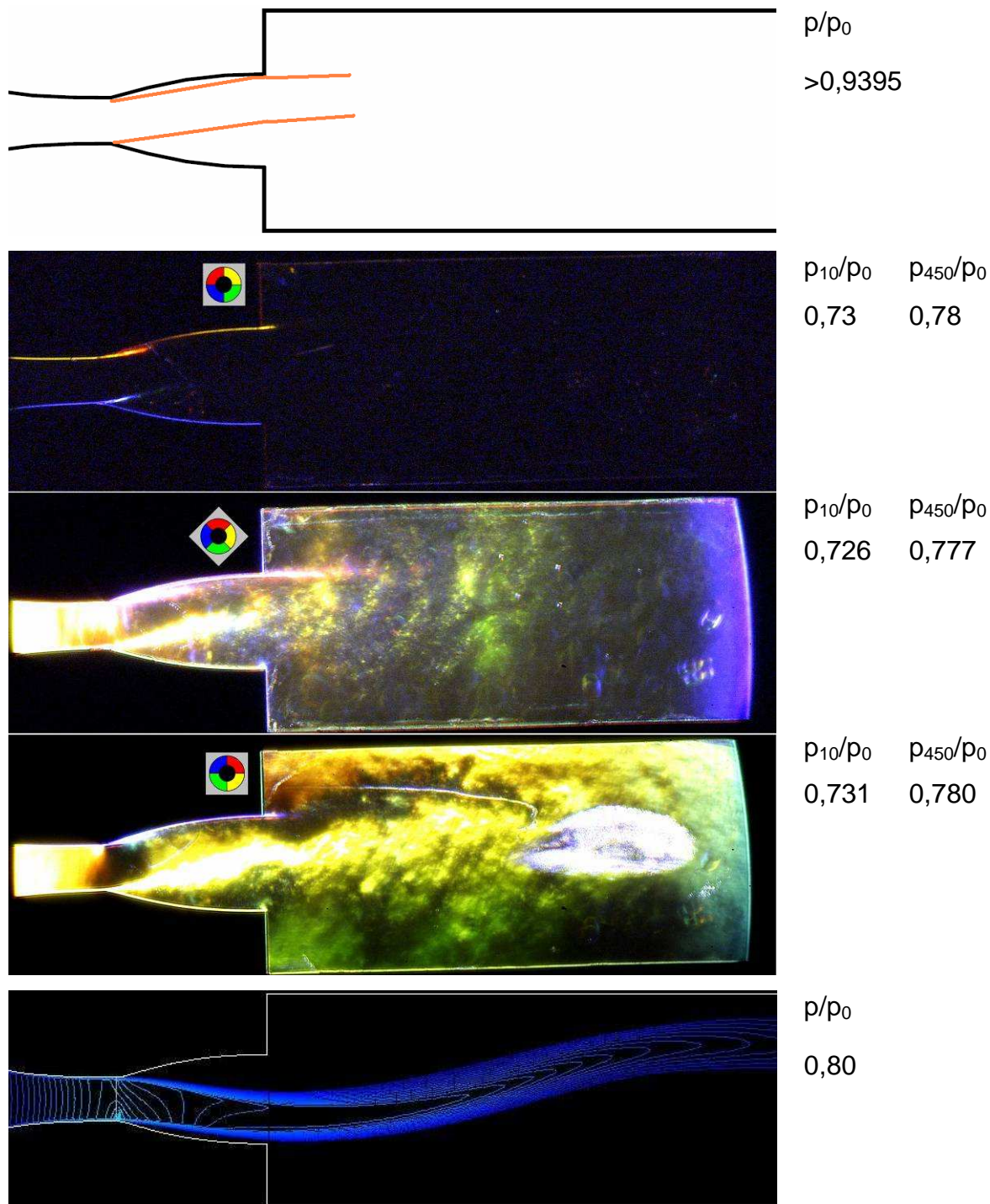
Při experimentu se vytvořila několika násobná Machova větev. V simulaci jsou vidět jen lehké náznaky tohoto úkazu.

Shrnutí trysky 1,8

Vlivem vyšších rychlostí dochází k výraznějším změnám hustoty v rázové vlně i ve vlnách kompresních a expanzních. Proto jsou tyto vlny v některých místech velmi přesvícené a jejich povaha (barva) se dá určit jen podle okrajů, kde intenzita dopadajícího světla nebyla tak vysoká. Simulace se do značné míry podobají experimentálně pořízeným snímkům až do návrhového režimu. Poté se již,

kvůli rozpěrným plechům, začínají odlišovat od snímků, ať už polohou rázových vln nebo i jejich tvarem.

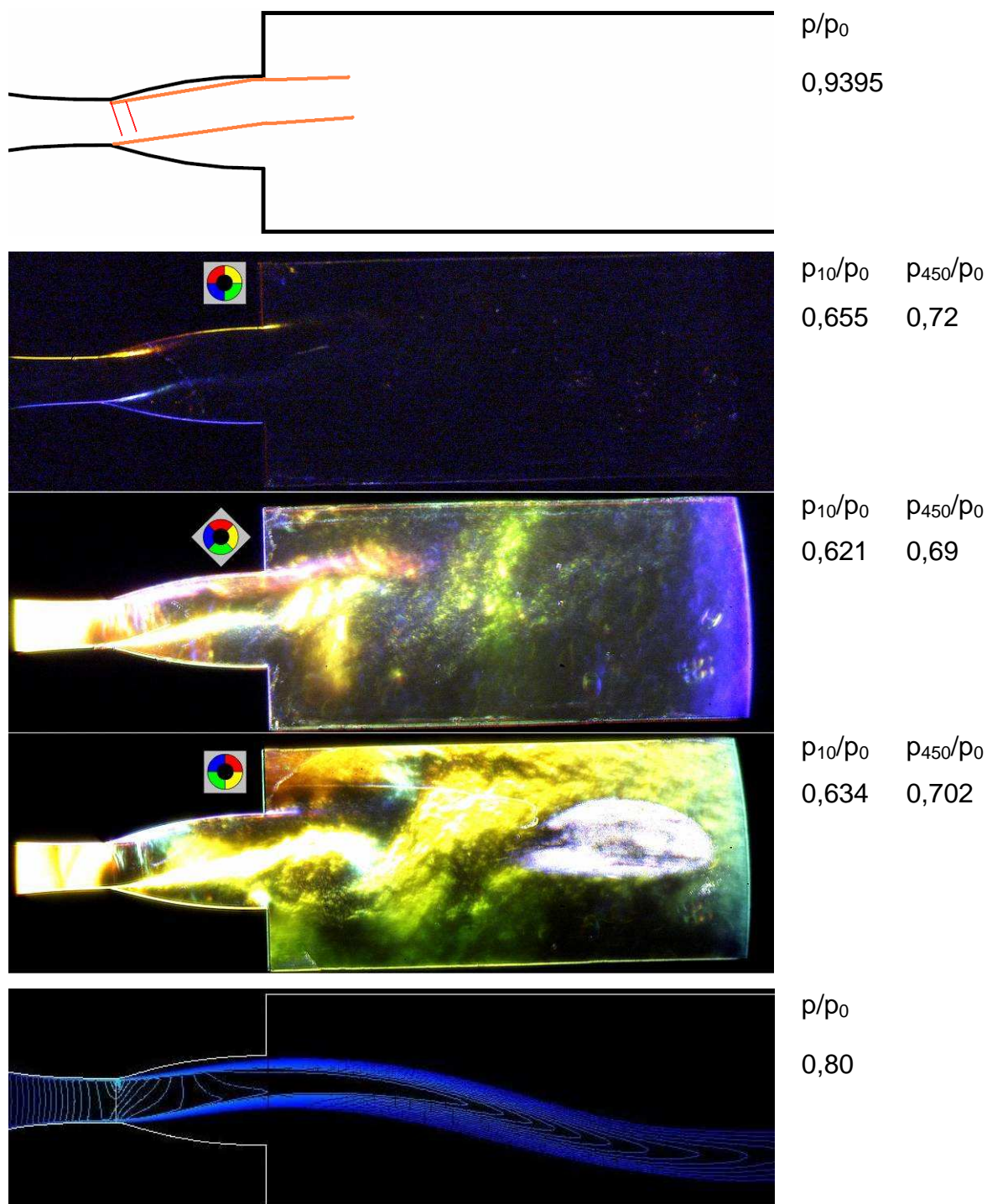
8.3 Tryska $M_n=2,2$



Obr. 8.25 Tryska $M_n=2,2$ podzvukový režim.

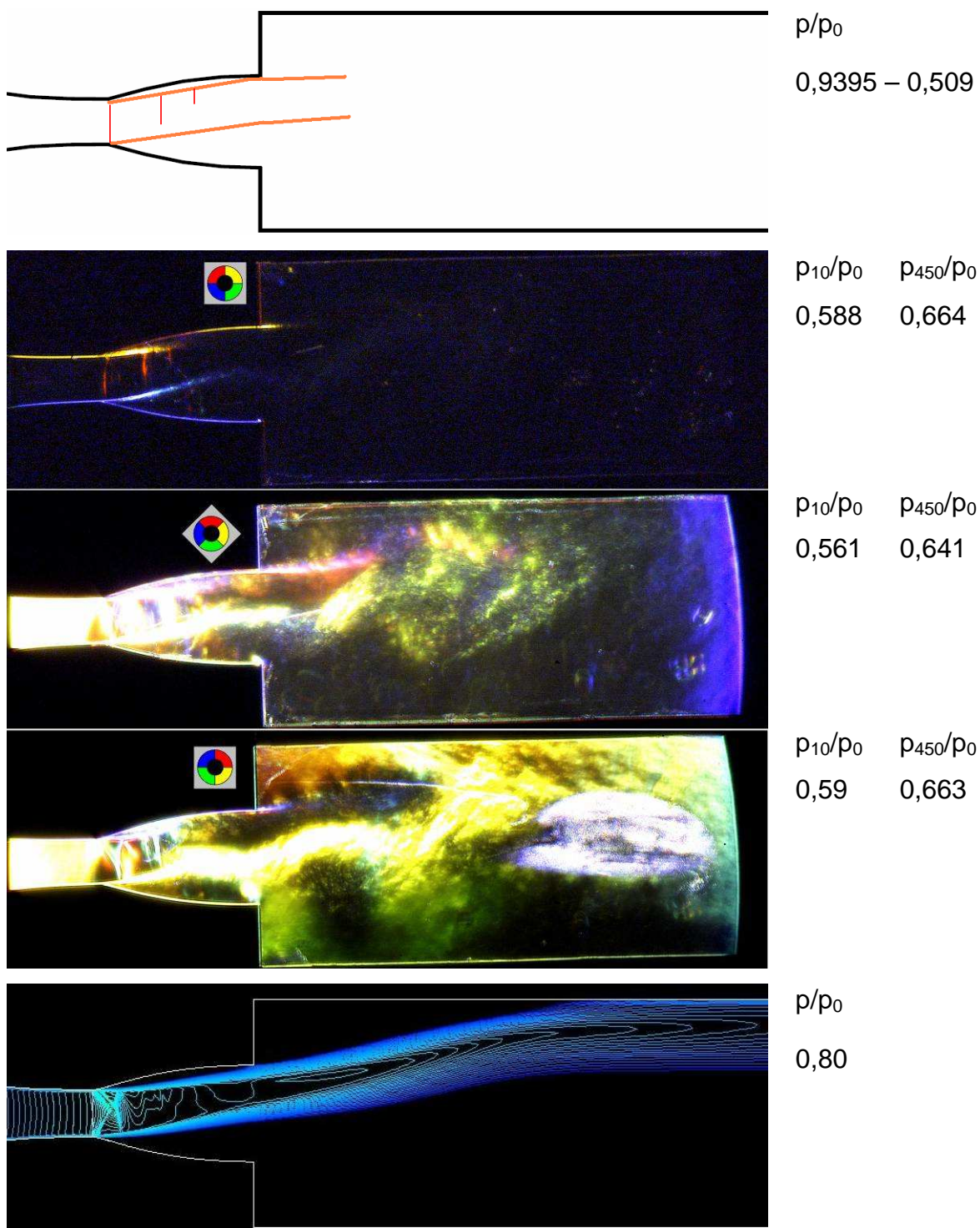
Tato tryska byla měřena jako první a proto se vyskytly některé komplikace, které již byly u pozdějších měření odstraněny. Jde především o kondenzaci vzdušné

vlhkosti na skle, která je vidět na třetím snímku (velká bílo-modrá skvrna). Také zde došlo ke zvýraznění nečistoty (pravděpodobně mastnoty) uchycené na jednom ze skel (tenká linka směřující od kondenzační skvrny směrem vlevo nahoru). Nečistota byla před druhým měřením (druhé snímky) odstraněna pomocí kapalného lihu. Při čištění vnitřní strany skel pomocí vaty na tyčce došlo k zatečení lihu mezi sklo a model trysky, čímž se rapidně zmenšila plocha, kterou mohl líh vyprchat a zůstal zde až do dalšího měření. Při něm byl stržen proudem a začala se tvořit na skle měřicího prostoru přibližná proudnice jak je vidět na dalších obrázcích (poprvé neznatelně na obr. 8.27 a od obr. 8.28 dále již zcela zřetelně).



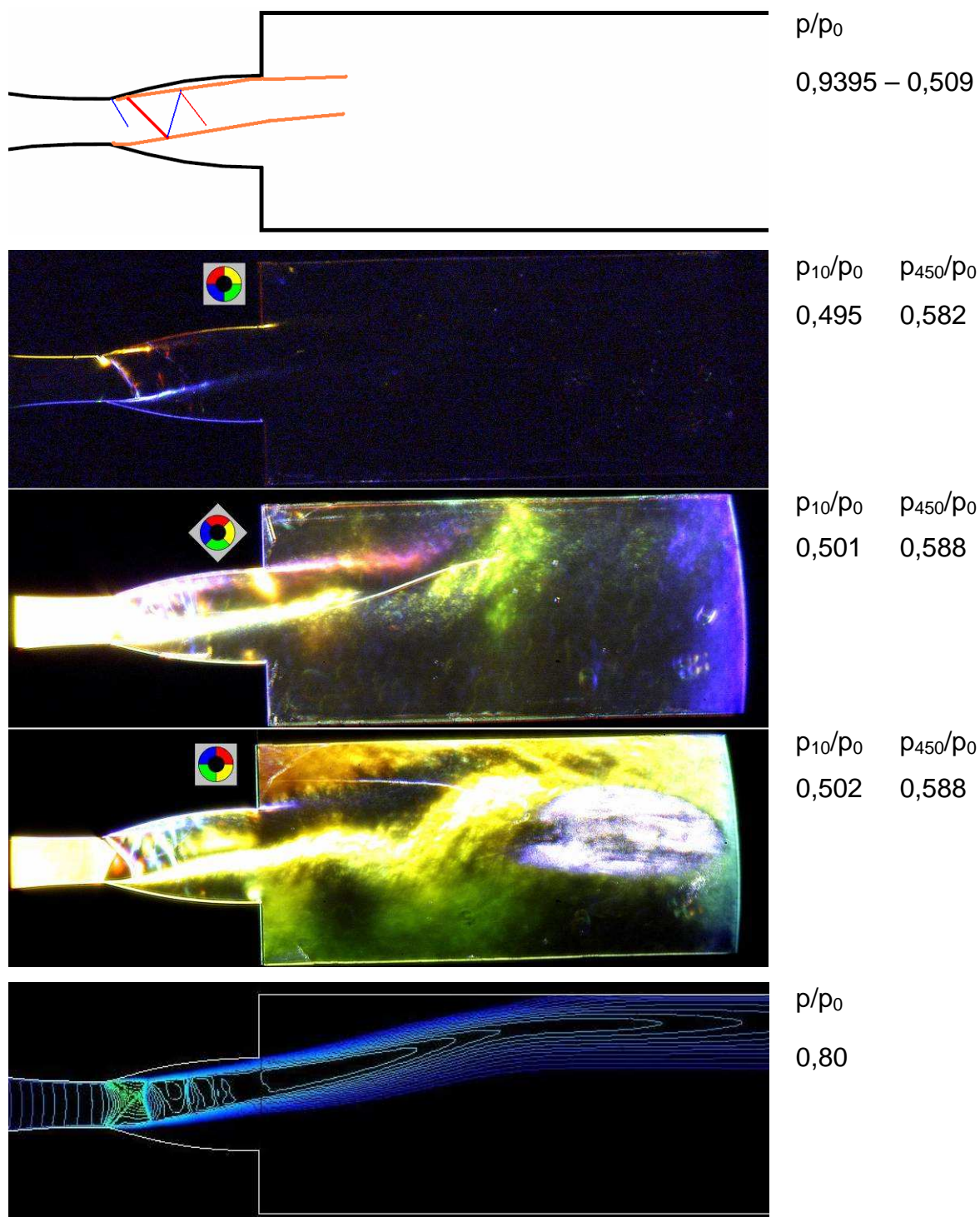
Obr. 8.26 Tryska $M_n=2,2$ mezní režim.

U této trysky se proud velmi odtrhával od stěny vlivem nepříznivého úhlu rozevření a především vlivem malého poloměru zaoblení hrdla.



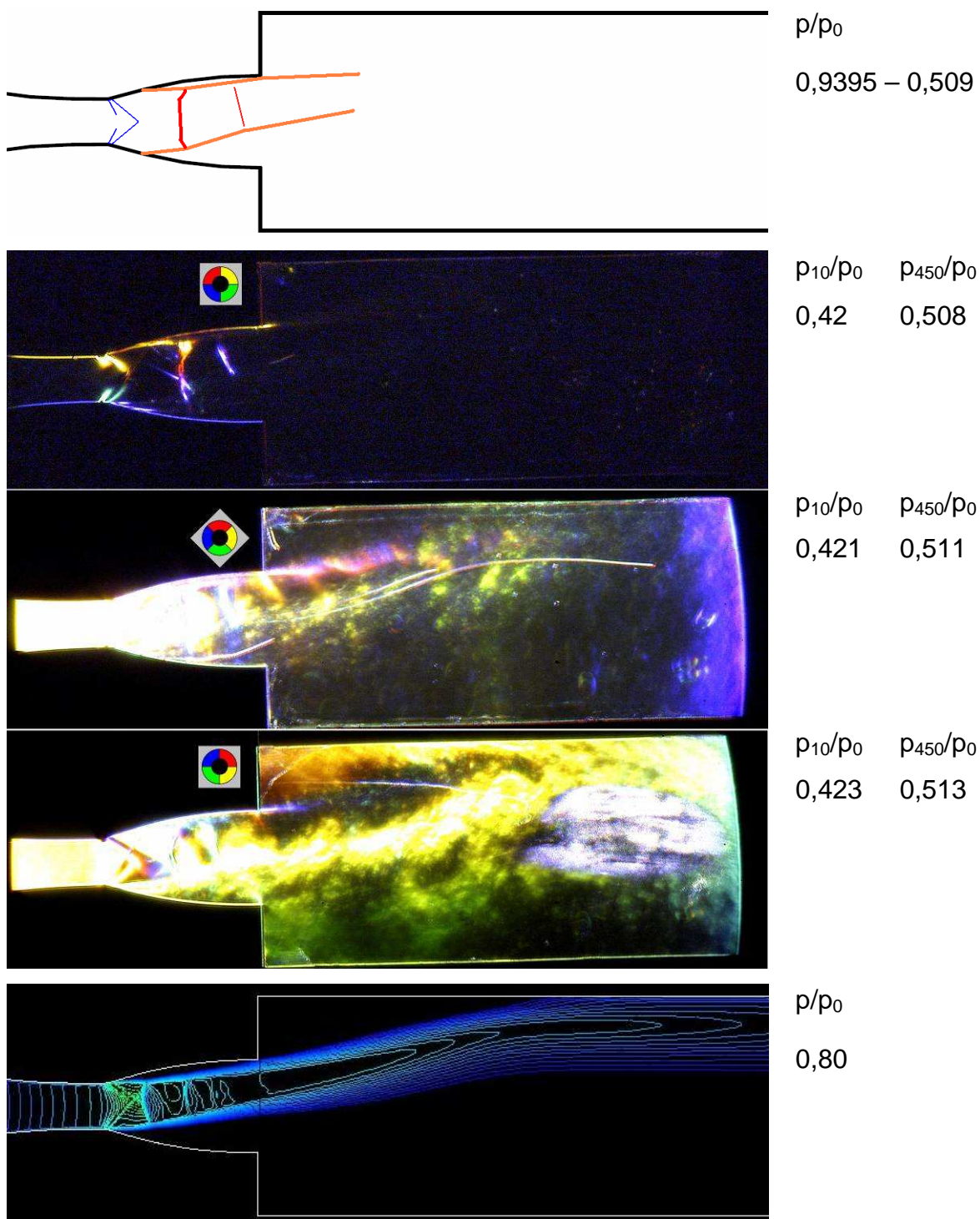
Obr. 8.27 Tryska $M_n=2,2$ rázová vlna v trysce.

Na prvním snímku a na simulaci je vidět mírné rozšíření proudu za hrdlem. Je to stejná struktura jako při podexpandovaném proudění za tryskou.



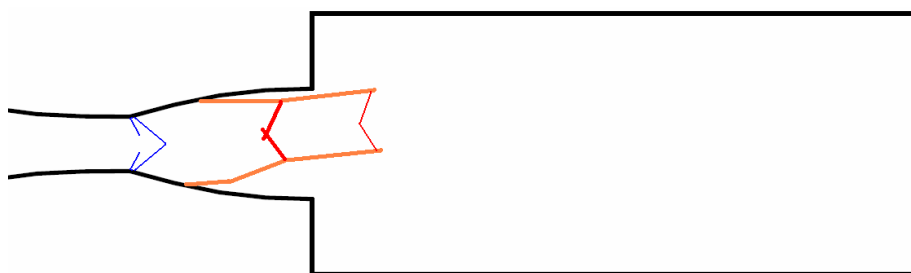
Obr. 8.28 Tryska $M_n=2,2$ rázová vlna v trysce.

Protože jsou druhý a třetí snímek hodně nasvícené (více otevřená clonka) jsou citlivé i na malé gradienty hustoty, ale větší změny, které jsou např. v trysce, jsou nezřetelné vlivem přesvícení.

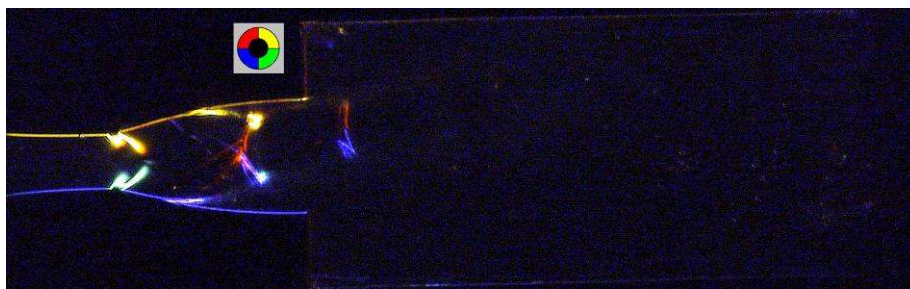


Obr. 8.29 Tryska $M_n=2,2$ rázová vlna v trysce.

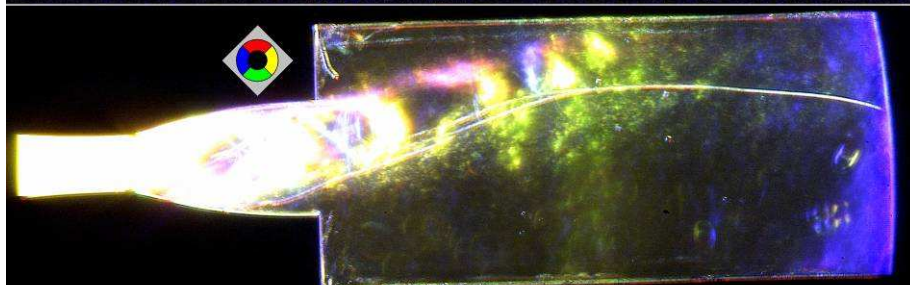
Druhý snímek odhaluje díky lihové proudnici směr proudění, který je podobný jako na simulaci. Důvod odklonu proudu již byl zmíněn.



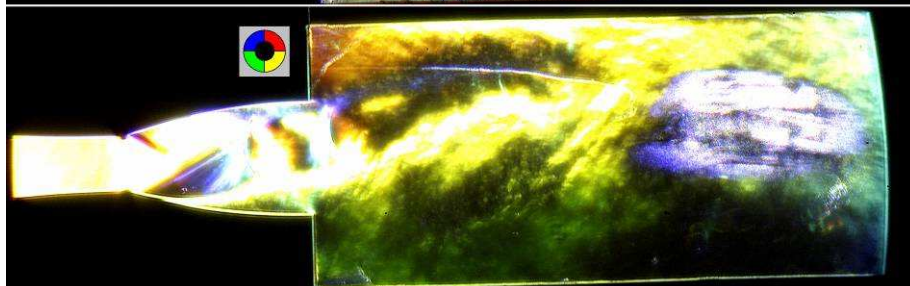
p/p_0
0,9395 – 0,509



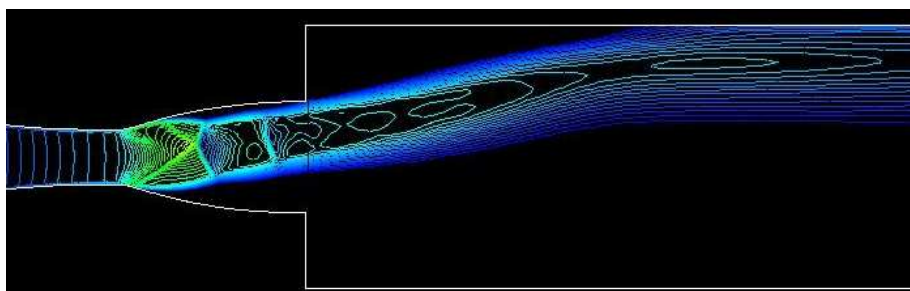
p_{10}/p_0 p_{450}/p_0
0,358 0,454



p_{10}/p_0 p_{450}/p_0
0,334 0,434

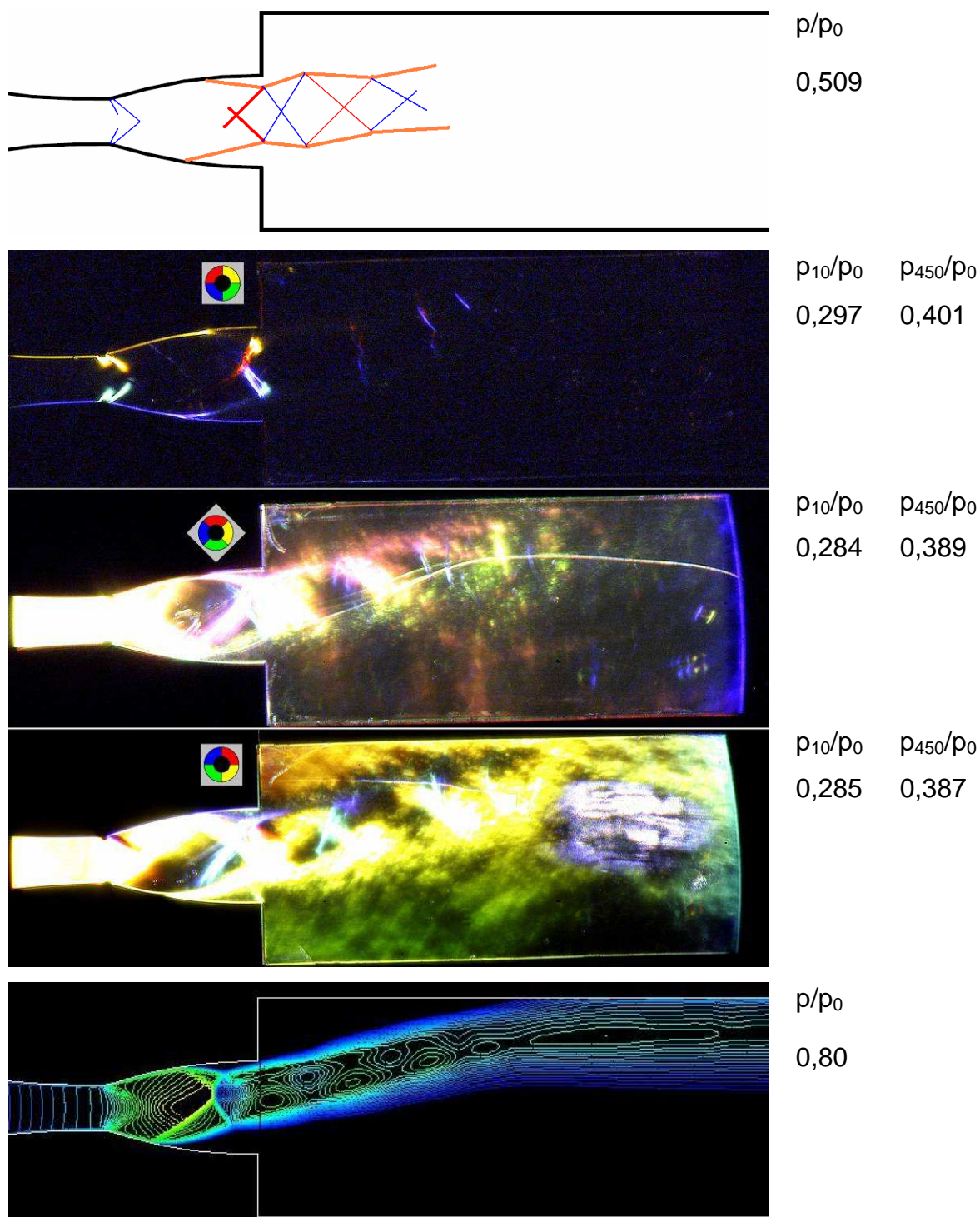


p_{10}/p_0 p_{450}/p_0
0,354 0,449



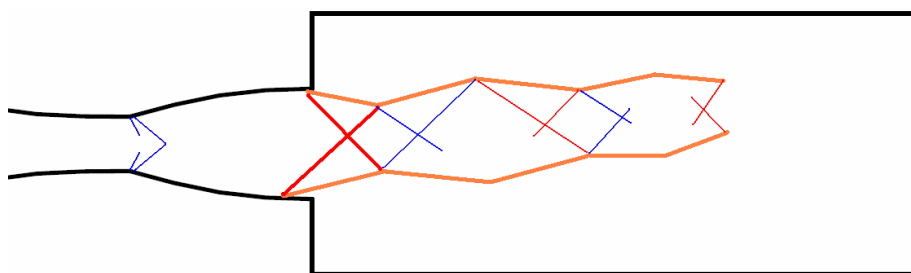
p/p_0
0,80

Obr. 8.30 Tryska $M_n=2,2$ rázová vlna v trysce.

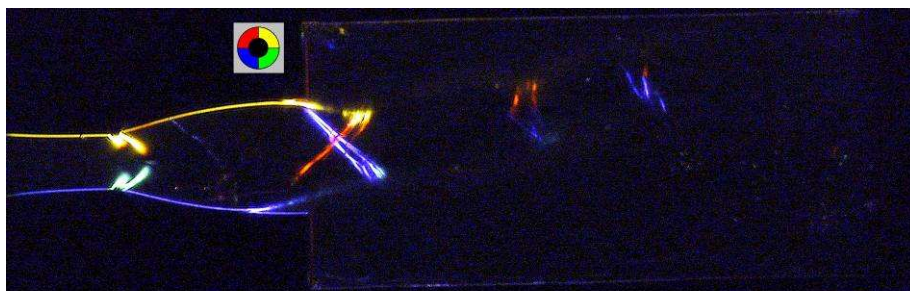


Obr. 8.31 Tryska $M_n=2,2$ rázová vlna ve výstupním průřezu.

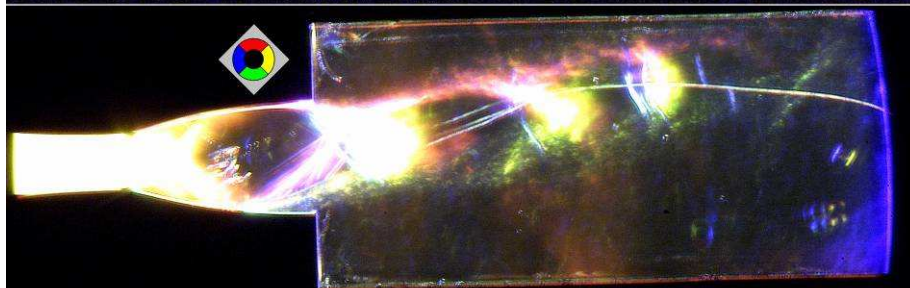
Toto je stav, který se režimu s rázovou vlnou ve výstupním průřezu podobal nejvíce, ale rázová vlna je příliš zasunuta v trysce.



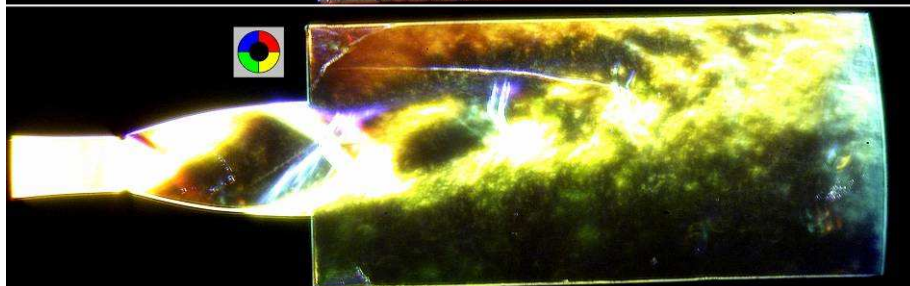
p/p_0
0,509-0,092



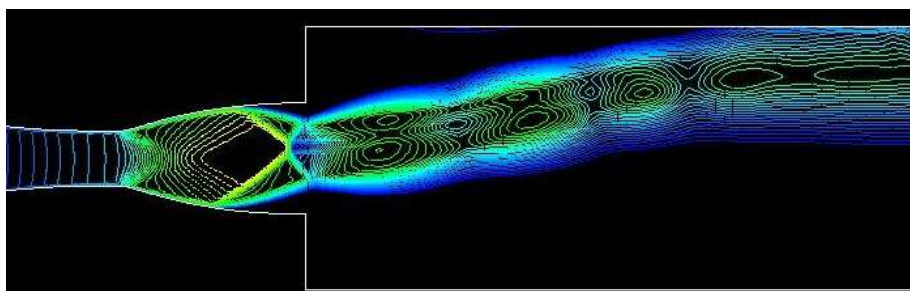
p_{10}/p_0 p_{450}/p_0
0,247 0,361



p_{10}/p_0 p_{450}/p_0
0,254 0,366



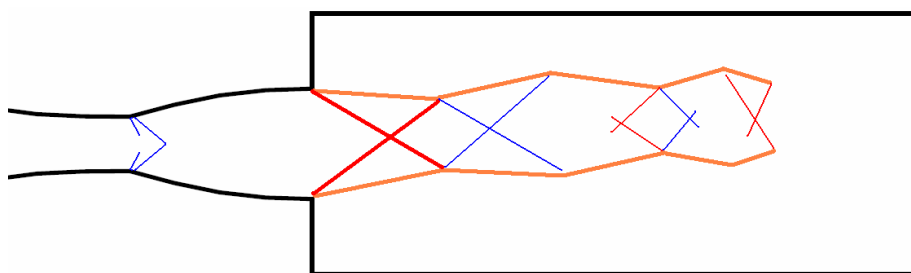
p_{10}/p_0 p_{450}/p_0
0,247 0,360



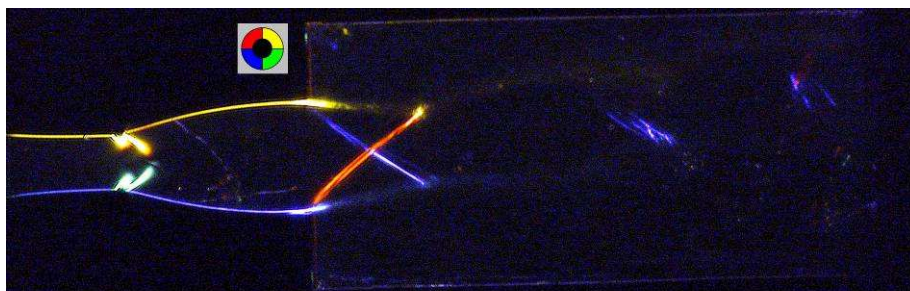
p/p_0
0,80

Obr. 8.32 Tryska $M_n=2,2$ přeexpandovaný proud.

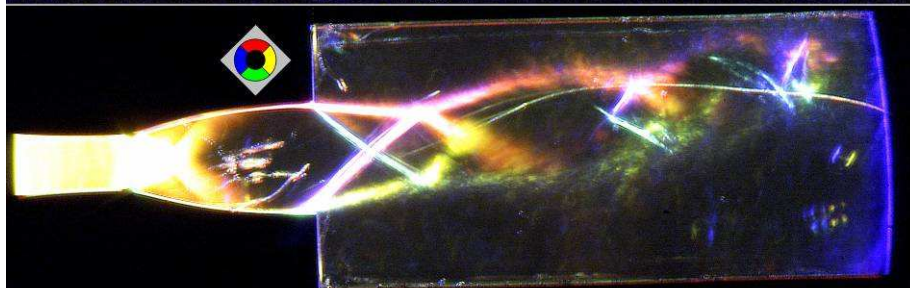
Opět vlivem ohybu proudu dochází k nesymetrii ve vzniklých rázových vlnách. Tentokrát je na všech obrázcích vidět opakující se komprese a expanze a dokonce na přibližně stejných místech.



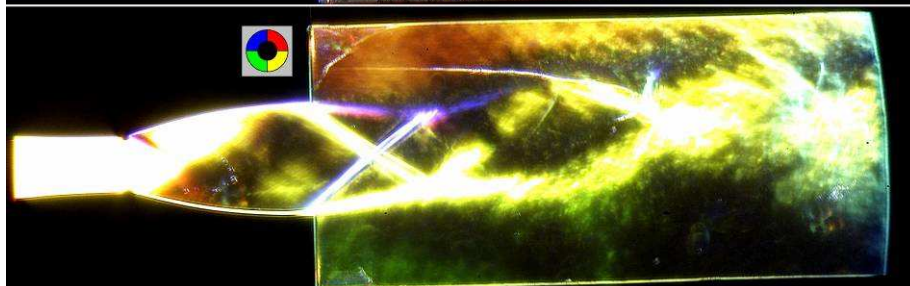
p/p_0
0,509-0,092



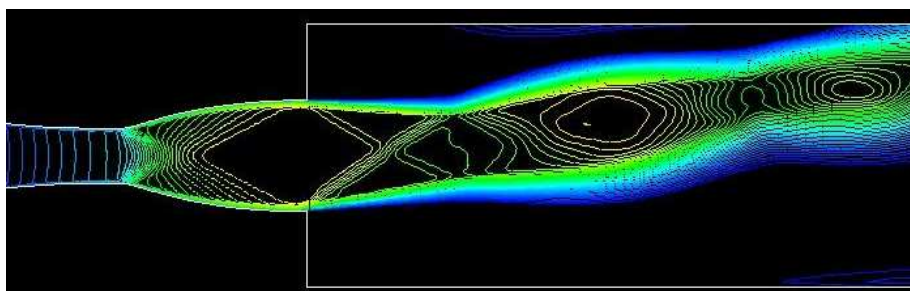
p_{10}/p_0 p_{450}/p_0
0,19 0,32



p_{10}/p_0 p_{450}/p_0
0,194 0,321



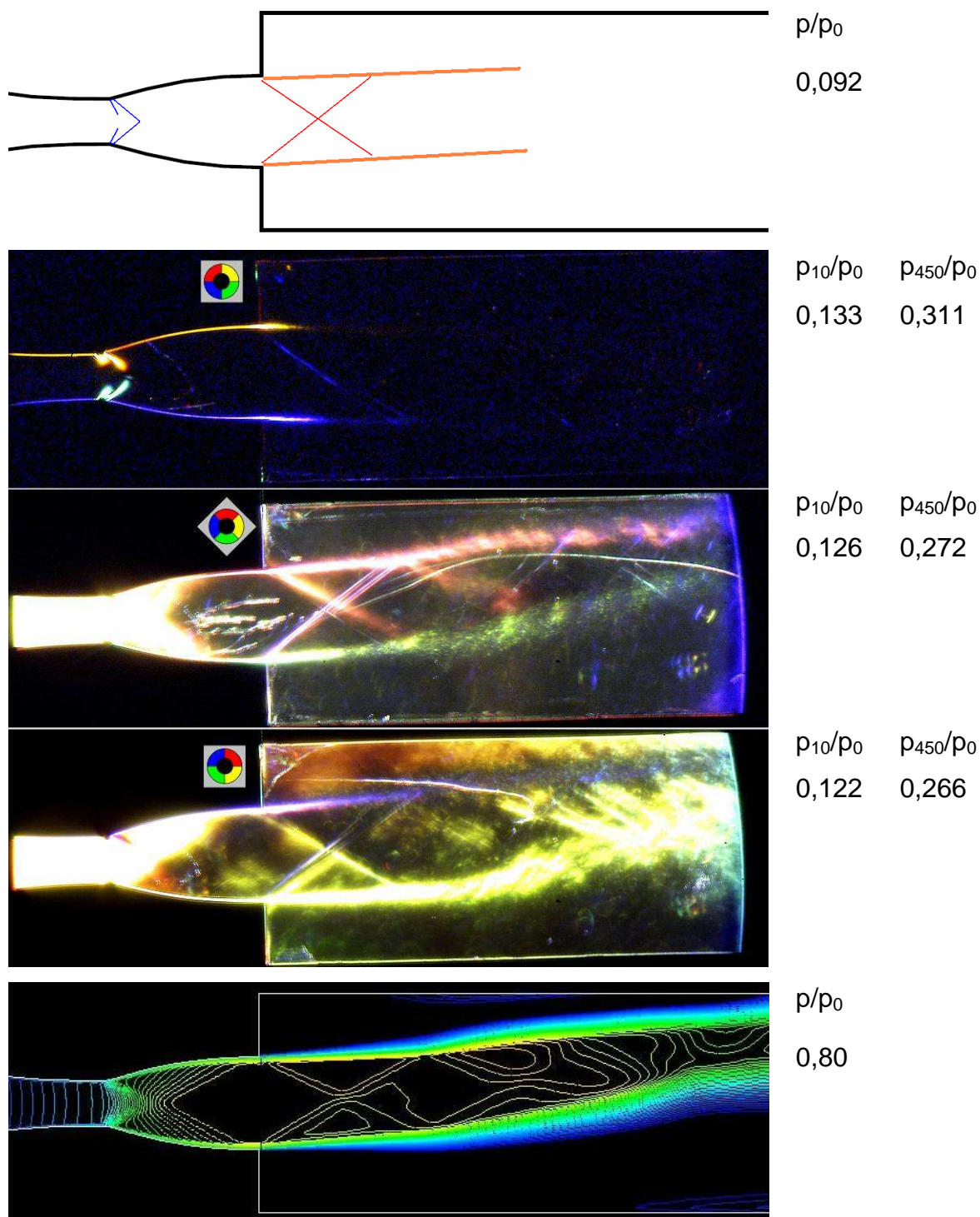
p_{10}/p_0 p_{450}/p_0
0,189 0,318



p/p_0
0,80

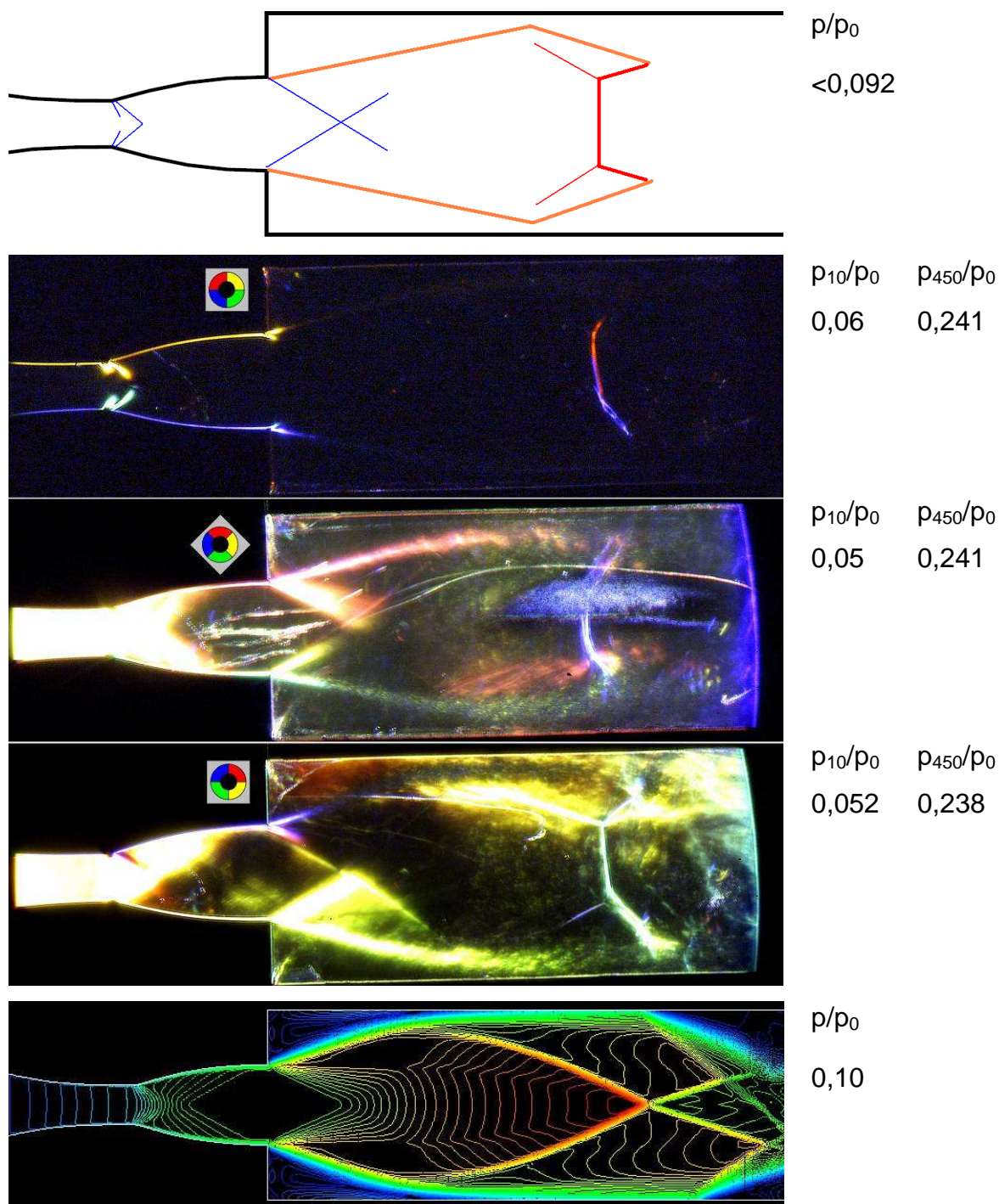
Obr. 8.33 Tryska $M_n=2,2$ přeexpandovaný proud.

Proudění se blíží návrhovému režimu, periodická struktura proudu se natahuje a rozdíly v šířce proudu se zmenšují.



Obr. 8.34 Tryska $M_n=2,2$ návrhový režim.

Návrhový režim na třetím snímku je spíše podexpandovaný proud, ale velmi blízko návrhovému, navíc u něj téměř nedošlo k ohnutí proudu. U druhého snímku se znovu projevuje Coandův jev (ohnutí proudu vlivem vazkosti a přísátí proudu k jedné ze stěn) a dochází zde k expanzi (z vrchu) a kompresi (ze zdola) za výstupem z trysky.



Obr. 8.35 Tryska $M_n=2,2$ podexpandovaný proud.

Shrnutí trysky 2,2

Simulace a experimentální snímky se až na poslední případ značně podobaly. Při snaze proměřit celé spektrum poměru tlaků opravdu důkladně, došlo kvůli dlouhodobému chodu tunelu ke kondenzaci vzdušné vlhkosti na sklech měřicího prostoru, což poté komplikovalo čtení snímků. I přesto jsou pořízené snímky

kvalitní s dobrou vypovídací hodnotou. Zvláště třetí série měření (první snímky), kdy byla clonka hodně zavřena a docházelo tak k zobrazení jen nejsilnějších gradientů hustoty, je pěkně ostrá a dobře čitelná.

9. Závěr

9.1 Dosažené výsledky

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a sestavit malý měřicí prostor pro supersonický aerodynamický tunel. Dále provést na tomto měřicím prostoru základní měření z nichž by se později vycházelo při finálním návrhu ejektoru pro pohon tohoto tunelu.

Významným přínosem této práce je vytvoření programu pro návrh tvaru nadzvukové trysky metodou charakteristik. Jeho hlavní výhodou je mnohonásobné urychlení návrhu (místo 10 hodin stačí 2 minuty) a tím možnost snadno měnit zadání pokud výsledek neodpovídá představám uživatele nebo zjemnit počáteční a koncovou část křivky. Pomocí prezentovaného programu byly úspěšně navrženy tři trysky, které se podařilo vyrobit v daných tolerancích a v požadované drsnosti. Metoda drátořezu pro obrábění duralu se velmi osvědčila, protože oproti řezání oceli je mnohem levnější a přitom stejně přesná. Pro tento případ byla výroba elektroerozivním obráběním dokonce levnější než výroba na konvenčních strojích.

Experimentální ověření měřicího prostoru a navržených trysek proběhlo v laboratoři vysokých rychlostí ústavu termomechaniky AVČR. Byly získány snímky barevnou zákalovou metodou a hodnoty tlaků v hrdlech trysek, za výstupem z trysky a na konci měřicího prostoru pro široký rozsah poměru tlaků.

Při experimentálním měření bylo získáno hodně praktických poznatků z oblasti vizualizace proudu, měření tlaku a experimentálních praktik. Následné vyhodnocování naměřených dat bylo zdrojem poznání, že pořídit data při měření je rychlé a po překonání obtíží i snadné, ale tyto data zpracovat a prezentovat v rozumné formě již vyžaduje velké množství mravenčí práce a času. Pokud se ovšem použije trochu sofistikovanější přístup a vytvoří se jednoduchá, ale silná makra, dá se čas potřebný na zpracování dat hodně zkrátit.

Výsledky numerických simulací se do značné míry a ve většině případech shodovaly s naměřenými daty. Odchylka příslušných tlakových poměrů byla v některých případech překvapivě vysoká, v jiných téměř shodná. To je vidět v porovnání, kde jsou k sobě přidruženy odpovídající si režimy bez ohledu na poměr tlaku.

9.2 Poznatky pro další vývoj

Pomocí podrobné analýzy získaných informací (statický a celkový tlak proudu při různých režimech trysek) je nyní možné navrhnout a sestavit výkonný vzduchový ejektor, schopný pohánět supersonický aerodynamický tunel v laboratoři Katedry energetických zařízení FS TUL.

Samotný měřicí prostor splnil většinu očekávání na něj kladených. Především bylo možno během jedné pracovní směny proměřit všechny trysky. A to s uspokojivými výsledky. Nicméně bylo odhaleno několik nedostatků komplikujících jeho použitelnost.

Při lepení skel do bočních stěn rámu, došlo ke zkroucení nosných profilů rámu, což bylo při montáži trysek nutno kompenzovat podložkami. Původní pomocné profily určené pro upevnění trysek a modelů se ukázaly být příliš poddajné při utahování šroubů a byly proto nahrazeny plným profilem. I přes tyto drobné vady byl základní účel splněn – trysku bylo možné vyměnit během 30 minut a pořízené snímky vypovídají o použitelnosti pro měření šlírovou zobrazovací metodou.

Díky dlouhému měřicímu prostoru je možné jej využít pro zkoumání Fannova procesu. Díky stavebnicovému uspořádání měřicího prostoru se v něm dají zkoumat difuzory a trysky v různých kombinacích, rozměrech a režimech. Zajímavým experimentem pro studenty by jistě bylo sledování chování projektilu ze střelné zbraně při nadzvukovém proudění, nebo pozorování rázových vln na profilu křídla pro nadzvuková i podzvuková letadla, případně šikmé rázové vlny v kanálech.

Seznam použité literatury

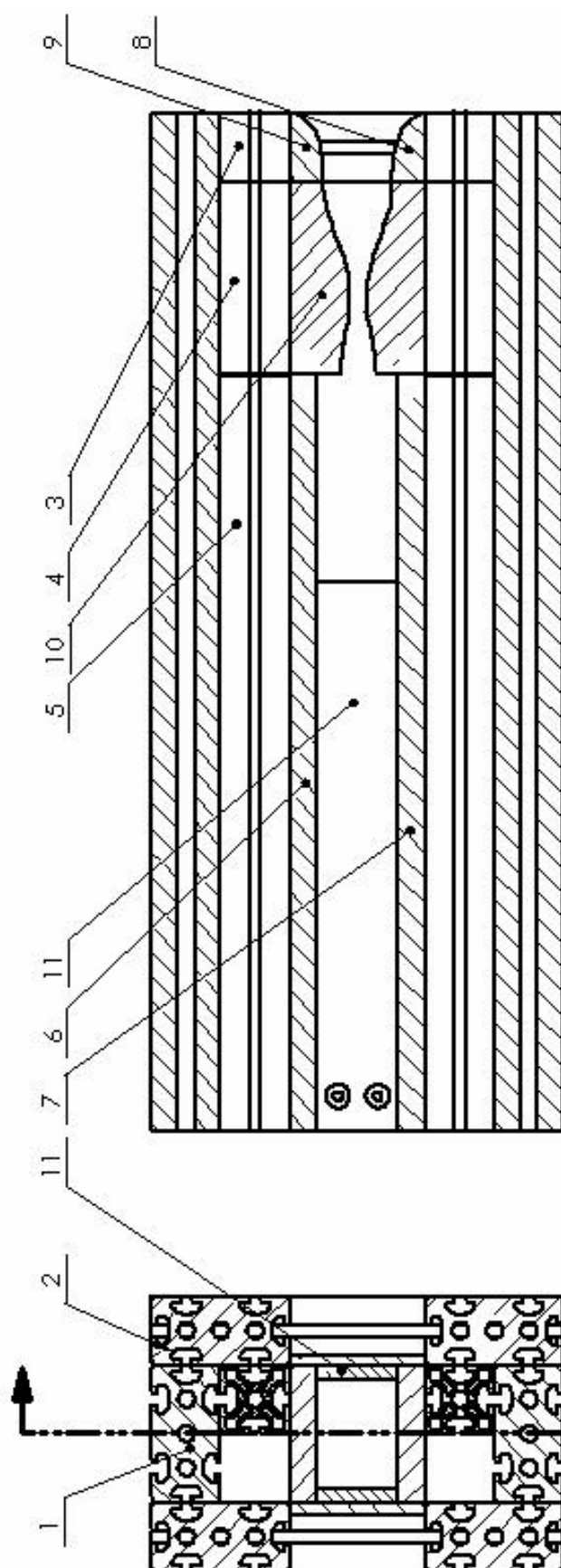
- [1] Kolář J.: Návrh a optimalizace ejektoru pro nadzvukový aerodynamický tunel. Diplomová práce, vedoucí Dvořák V., Technická univerzita v Liberci, 2007.
- [2] Dvořák V.: Úvod do proudění stlačitelných tekutin. Technická univerzita v Liberci, Liberec, ISBN 978-80-7372-458-0.
- [3] Dvořák V.: Proudění v tryskách a difuzorech. Technická univerzita v Liberci, Liberec, ISBN 978-80-7372-457-3.
- [4] Dvořák V.: Proudové procesy v ejektoru. Doktorská disertační práce. Technická univerzita v Liberci, 2003.
- [5] Panuš R.: Optimalizace nadzvukových trysek. Diplomová práce, vedoucí Dvořák V., Technická univerzita v Liberci, 2004.
- [6] Dvořák V., Stupka O., Kolář J.: Design and Numerical Calculation of Variable Test Section for Small Supersonic Wind Tunnel, XXIX. Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky, 23.-25.6. 2010, Rožnov pod Radhoštěm, Česká republika, pp. 41 – 43, ISBN 978-80-248-2244-0.
- [7] Krahulec Š.: Výpočtové metody pro návrh vzduchových ejektorů. Diplomová práce, vedoucí Dvořák V., Technická univerzita v Liberci, 2004.
- [8] Dvořák V.: Shape Optimization of Supersonic Ejector for Supersonic Wind Tunnel. In.: Applied and Computational Mechanics, Volume 4, Number 1, 2010, Plzeň, Česká republika, pp 15-24, ISSN 1802-680X.
- [9] Shapiro A.H.: The dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow. The Ronald Press Company, New York, 1953.
- [10] HANUS, D., ANDERLE, P. ČENSKÝ, T. ADAMEC, J., NOŽIČKA, J.: Low Turbulence Wind Tunnel for Investigation of Complex Turbulent Flow. In. Proceedings of WORKSHOP 2001, Part A, CTU REPORTS, ISBN 80-10-02335-4, Prague, February 2001.
- [11] Fluent 6.3 User's Guide, Fluent Inc. 2006.
- [12] Bejček, L.; Vaculík, J. Snímače tlaku, 2011. Automa. http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=42719 (accessed May 10, 2011).
- [13] XTL-123B-190. Kulite. <http://www.advizia.com/v41/ModelDetail.asp?User=transducers&PkgOrder=198&Rnd=169> (accessed May 10, 2011).

- [14] Katalog duralových profilů firmy MayTec.
- [15] Hofer, T.; Šafařík, P.; Luxa, M. Proudové pole ve vstupní části aerodynamického tunelu; 2005.

Seznam příloh

Příloha 1	Sestava tunelu
Příloha 2	Katalogový list tlakového snímače
Příloha 3	Katalogový list zesilovače signálu

Příloha 1. Sestava tunelu.



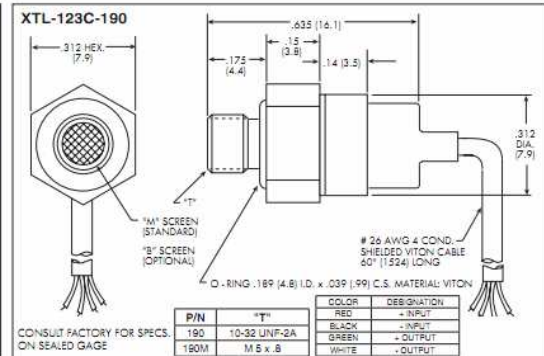
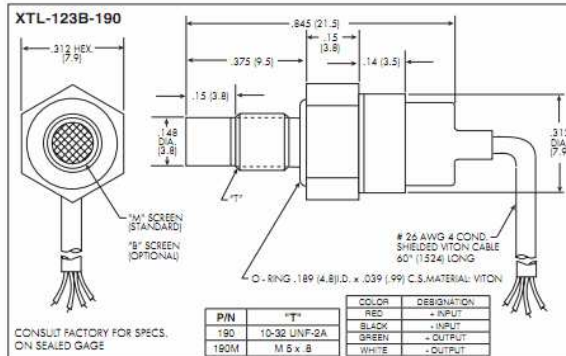
ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Profile_50x100_6E_S_720	Profil 50x100, 6E, S	2
2	ram_bok		2
3	Profile_50x50_4E_S_50	Profil 50x50, 4E, S	2
4	Profile_50x50_4E_S_140	Profil 50x50, 4E, S	2
5	Profile_50x50_4E_S_550	Profil 50x50, 4E, S	2
6	hvar_rovny_550		1
7	hvar_rovny_550		1
8	sani		1
9	sani		1
10	tryska22		2
11	rozperny_plech		2

Příloha 2. Katalogový list tlakového snímače.



RUGGEDIZED AUTOMOTIVE IS® PRESSURE TRANSDUCERS XTL-123B-190 (M) SERIES XTL-123C-190 (M) SERIES

- Easy Installation
- High Natural Frequency
- 10-32 UNF or M 5 x .8 Thread
- Wide Temperature Range
- Compatible With All Automotive Fluids
- Intrinsically Safe Patented Leadless Technology Available (i.e. IS-XTL-123B-190 or IS-XTL-123C-190)



INPUT	1.0	1.7	3.5	7	17	35	70	100	210 BAR
Pressure Range	15	25	50	100	250	500	1000	1500	3000 PSI
Operational Mode	Absolute, Sealed Gage, Gage, Differential					Absolute, Sealed Gage			
Over Pressure	2 Times Rated Pressure to a Maximum of 4500 PSI (315 BAR)								
Burst Pressure	3 Times Rated Pressure to a Maximum of 4500 PSI (315 BAR)								
Pressure Media	All Nonconductive, Noncorrosive Liquids or Gases (Most Conductive Liquids and Gases - Please Consult Factory)								
Rated Electrical Excitation	10 VDC								
Maximum Electrical Excitation	15 VDC								
Input Impedance	1000 Ohms (Min.), 5000 Ohms (Max.)								
OUTPUT									
Output Impedance	1000 ± 500 Ohms								
Full Scale Output (FSO)	100 mV ± 10 mV								
Residual Unbalance	± 5mV (Typ.)								
Combined Non-Linearity, Hysteresis and Repeatability	± 0.1% FSO BFSL (Typ.), ± 0.5% FSO (Max.)								
Resolution	Infinitesimal								
Natural Frequency (KHz) (Typ.)	Greater Than 175 KHz								
Acceleration Sensitivity % FS/g Perpendicular	6.5x10 ⁻⁴	5.0x10 ⁻⁴	3.0x10 ⁻⁴	1.5x10 ⁻⁴	1.0x10 ⁻⁴	6.0x10 ⁻⁵	4.5x10 ⁻⁵	3.5x10 ⁻⁵	2.0x10 ⁻⁵
Transverse	1.0x10 ⁻⁴	6.0x10 ⁻⁵	4.0x10 ⁻⁵	2.0x10 ⁻⁵	9.0x10 ⁻⁶	6.0x10 ⁻⁶	3.0x10 ⁻⁶	2.7x10 ⁻⁶	2.0x10 ⁻⁶
Insulation Resistance	100 Megohm Min. @ 50 VDC								
ENVIRONMENTAL									
Operating Temperature Range	-65°F to +400°F (-55°C to +204°C)								
Compensated Temperature Range	-40°F to +350°F (-40°C to +175°C)								
Thermal Zero Shift	± 1% FS/100°F (Typ.)								
Thermal Sensitivity Shift	± 1% /100°F (Typ.)								
Linear Vibration	100g Peak, Sine Up to 5000 Hz								
Humidity	100% Relative Humidity								
Mechanical Shock	100g half Sine Wave 11 msec. Duration								
PHYSICAL									
Electrical Connection	4 Conductor 26 AWG Shielded Viton Cable 60" Long								
Weight	5 Grams (Nom.) Excluding Cable								
Pressure Sensing Principle	Fully Active Four Arm Wheatstone Bridge Dielectrically Isolated Silicon on Silicon Patented Leadless Technology								
Mounting Torque	15 Inch-Pounds								

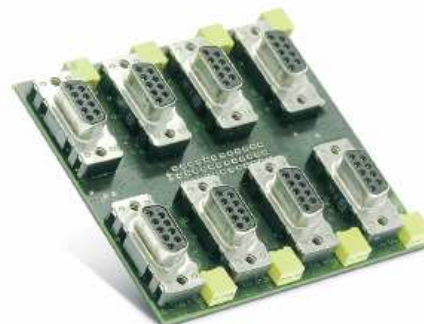
Note: Custom pressure ranges, accuracies and mechanical configurations available. Dimensions are in inches. Dimensions in parenthesis are in millimeters. Continuous development and refinement of our products may result in specification changes without notice - all dimensions nominal. (P)

KULITE SEMICONDUCTOR PRODUCTS, INC. • One Willow Tree Road • Leonia, New Jersey 07605 • Tel: 201 461-0900 • Fax: 201 461-0990 • <http://www.kulite.com>

MDAQ-SUB-BRIDGE-D

Analog input amplifier MDAQ-SUB-BRIDGE-D

- High accuracy (0.05%) full bridge amplifier
- Internal half bridge completion
- Input short-circuit function for measuring absolute strain
- Bridge and voltage measurement mode
- AC/DC coupling (0.16 Hz high pass filter)
- TEDS support



Specifications

MDAQ-SUB-BRIDGE-D combined with MDAQ-BASE-5				
Gain	0.5 to 2000			
Input ranges @ 5 V _{DC} excitation	±2.5, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 200, 250, 500, 1000, 1250, 2500, 5000, 10 000 mV ±0.5, 1, 2, 4, 5, 10, 20, 40, 50, 100, 200, 250, 500, 1000 mV/V			
Input impedance	1 Mohm			
Input noise	3.5 nV * √Hz			
Typ. input offset drift	0.5 μV/K (for ranges < 200 mV)			
DC Accuracy	High Gain	without software correction table		
±2.5mV; 5mV/V; 10mV/V; ±25mV	±0.03% of reading	±15μV [±3μV/V @ 5V _{exc}]	±0.15% of reading	±15μV [±3μV/V @ 5V _{exc}]
20mV	±0.03% of reading	±0.12% of range	±0.15% of reading	±0.12% of range
50mV	±0.03% of reading	±0.06% of range	±0.15% of reading	±0.06% of range
±100mV to ±200mV	±0.03% of reading	±0.03% of range	±0.15% of reading	±0.03% of range
±0.250 to ±1V	Low Gain	400μV [±80μV/V @ 5V _{exc}]	±0.15% of reading	400μV [±80μV/V @ 5V _{exc}]
±1.25V; ±2.5V	±0.03% of reading	±1mV	±0.15% of reading	±1mV
±5; 10V	±0.02% of reading	±0.03% of range	±0.15% of reading	±0.03% of range
Gain drift @ 5 V _{DC} excitation	10 ppm/K of range ±0.02 μV/V/K			
Excitation voltage	0.25, 0.5, 1, 2.5, 5V (default) and 10 V _{DC} software programmable			
Excitation accuracy	±0.05% ±0.7 mV			
Excitation drift	±10 ppm/K ±50 μV/K			
Excitation current limit	50 mA/Channel			
Excitation protection	continuous short to ground			
Sensor supply (+15 V)	accuracy: -5% to +2%; Each output separately fused; max. current 50 mA/channel			
Bridge types	4- or 6-wire full bridge 3- or 5-wire ½ bridge with internal completion (software programmable)			
Bridge resistance	120 Ohm to 10 k Ohm			
Automatic bridge balance ¹⁾	absolute Voltage	mV/V @ 5V _{exc}	μm/m @ 5V _{exc} k=2	Quater bridge
2.5mV to 20mV	±10mV	±2mV/V	±4000μm/m	
25mV to 200mV	±100mV	±20mV/V	±40000μm/m	
250mV to 1V	±0.5V	±100mV/V	±200,000μm/m	
2V to 10V	±5V	±1000mV/V	±2,000,000μm/m	
Bandwidth (-3dB)	30 kHz			
Filters (lowpass)	in combination with MDAQ-FILT-xx			
Typ. SNR @ 30 kHz [1 kHz] and 5 V _{DC} excitation	64 dB [82 dB] @ 1 mV/V 82 dB [96 dB] @ 50 mV/V			
Typ. CMR @ 0.1 mV/V [1 mV/V] and 5 V _{DC} excitation	125 dB [120 dB] @ DC 115 dB [110 dB] @ 400 Hz 110 dB [105 dB] @ 1 kHz			
Max. common mode voltage range	±12 V			
Input overvoltage protection	±25 V _{DC}			
Output voltage	±5 V, ±10 V with MDAQ-BASE-10			
Output resistance	< 10 Ohm			
Output current	max. 5 mA			
Output protection	continuous short to ground			
TEDS	hardware support for TEDS (Transducer Electronic Data Sheet)			
Supported TEDS chips	DS2406, DS2430A, DS2432, DS2433			
Power consumption for 16 channels @ 5 VDC excitation	350 Ohm @ 10V Exc. typ. 15 W 120 Ohm @ 5V typ. 15 W			
@ 10 VDC	350 Ohm max. @ 15 W max. 120 Ohm @ 15 W			
Standard operating temperature	0°C to 70°C (32°F to 158°F)			

¹⁾ MDAQ-BASE-10A has the half offset adjustment range